



# ТРАНСПОРТ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ



№ 1 (43) 2015



**Природный газ –  
эффективное моторное топливо**

**Газовый КАМАЗ – испытание Африкой пройдено!**

**Локомотивы, работающие на природном газе**

**Обзор систем аккумулирования водорода на борту АТС**

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору  
в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны  
культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-30114

Включен в Перечень ВАК

**Учредитель и издатель**

НП «Национальная газомоторная ассоциация» (НГА),  
аффилирована с Международным газовым союзом

**Периодичность**

6 номеров в год

**Главный редактор**

**П.Г. Цыбульский**

генеральный директор ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

**Члены редакционной коллегии**

**А. Беранек**

генеральный директор ООО «ВИТКОВИЦЕ Рус» (Чехия)

**Б.В. Будзуляк**

председатель Комиссии по использованию  
природного и сжиженного нефтяного газа  
в качестве моторного топлива, д.т.н.

**С.П. Горбачев**

профессор, главный научный сотрудник  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», д.т.н.

**В.И. Ерохов**

профессор «МАМИ», д.т.н.

**Р.З. Кавтарадзе**

профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**Т.В. Климова**

начальник службы по связям с общественностью  
и СМИ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
заместитель главного редактора

**С.И. Козлов**

профессор, д.т.н.

**С.В. Люгай**

директор Центра использования газа  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н., исполнительный директор НГА

**В.А. Марков**

профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

**А.В. Николаенко**

ректор «МАМИ», профессор, д.э.н.

**Ю.В. Панов**

профессор МАДИ, к.т.н.

**Н.Н. Патрахальцев**

профессор Российского университета дружбы народов, д.т.н.

**Е.Н. Пронин**

член совета НГА

**В.Л. Стативко**

ветеран газовой отрасли, к.т.н.

**В.Н. Фатеев**

зам. директора НИИЦ «Курчатовский институт», д.х.н.

**Редактор**

**О.А. Ершова**

E-mail: transport.1@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 76

**Отдел подписки и рекламы**

E-mail: transport.2@ngvrus.ru

Тел.: +7 (498) 657 29 77

**Перевод**

**А.И. Хлыстова**

**Компьютерная верстка**

**И.В. Шерстюк**

**Адрес редакции:**

142717, Московская обл., Ленинский р-н, п. Развилка, а/я 253  
www.ngvrus.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Принт-Лидер»,

117186, Москва, ул. Нагорная, д. 15, корп. 8

Номер заказа

Сдано на верстку 15.12.2014 г.

Подписано в печать 15.01.2015 г.

Формат 60x90 1/8. Тираж 3000 экз. Бумага мелованная.

Печать офсетная, печ. л. 10,5

При перепечатке материалов ссылка на журнал

«Транспорт на альтернативном топливе» обязательна.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации,

опубликованной в рекламных материалах

На обложке:

ралли-марафон Africa Eco Race 2015

## В НОМЕРЕ

Газовый КАМАЗ – испытание Африкой пройдено!.....	3
Научно-практический семинар «Потребительский рынок газомоторного топлива: состояние, проблемы и пути их решения».....	9
<b>Белоусова С.Ю., Зарубин В.С., Осадчий Я.Г.</b> Численное моделирование теплового состояния металлокомпозитного автомобильного баллона при расходовании метана.....	12
<b>Руденко В.Ф.</b> Локомотивы, работающие на природном газе.....	22
<b>Ерохов В.И.</b> Эффективность применения диметилэфира на автомобильном транспорте.....	30
<b>Фомин В.М.</b> Системы аккумулирования водорода на борту автотранспортного средства.....	45
Инновационный проект «Газпром газэнергосеть» по производству СПГ в Прикамье.....	54
<b>Марков В.А., Шумовский В.А., Акимов В.С.</b> Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, работающего на водотопливной эмульсии.....	56
ГБА и баллоны.....	66
Международная конференция «СПГ 2014»: есть основания для оптимизма.....	67
Международная конференция «КПГ 2014»: медленно, но верно.....	70
Рейтинг экологической ответственности нефтегазовых компаний РФ.....	73
Газомоторные автобусы в Йоханнесбурге.....	74
Увеличение числа АГНКС в Дели.....	75
Природный раз – спасение Израиля от загрязнения.....	75
Японское классификационное общество одобрило новый дизайн двухтопливного мотора.....	76
Abstracts of articles.....	77
Авторы статей в журнале № 1 (43) 2015 г.....	78
Перечень статей, опубликованных в журнале «Транспорт на альтернативном топливе» в 2014 г.....	79



**Founder and Publisher**

Non-Commercial Partnership National Gas-Vehicle  
Association (NGVRUS), is affiliated with IGU

**Published**

6 issues a year

**Editor-in-Chief**

**Tsybul'sky, P.G.**

Director General of Gazprom VNIIGAZ, PHD

**Editorial board members**

**Beranek Antonin**

Director General

of VÍTKOVICE Rus (Czech Republic)

**Budzulyak, B.V.**

Chairman of the Commission for Use of Natural

and Liquefied Petroleum Gas as Gas-Motor Fuel,

Doctor of Engineering

**Erokhov, V.I.**

MAMI Professor, Doctor of Engineering

**Gorbachev, S.P.**

Professor, Gazprom VNIIGAZ, Doctor of Engineering

**Kavtaradze, R.Z.**

Professor of N.E. Bauman's MGTU, Doctor of Engineering

**Klimova, T.V.**

acting Head of Public and Mass Media Relations Service

of Gazprom VNIIGAZ, deputy chief editor

**Kozlov, S.I.**

Professor, Doctor of Engineering

**Lyugai, S.V.**

PhD, Director of the Centre «Gas Use»,

JSC «Gazprom VNIIGAZ»,

executive director, NGVRUS

**Markov, V.A.**

Professor of N.E. Bauman's MGTU,

Doctor of Engineering

**Nikolaenko, A.V.**

Rector of the Moscow State Technical University (MAMI), Professor,

Doctor of Science

**Panov, Yu.V.**

Professor of MADI (GTU), PHD

**Patrakhaltsev, N.N.**

Professor of People's Friendship University of Russia,

Doctor of Engineering

**Pronin, E.N.**

member of the Council, NGVRUS

**Stativko, V.L.**

The vet of gas industry, Candidate of Science

**Fateev, V.N.**

Deputy Director of RNC Kurchatovsky Institute,

Doctor of Chemistry

**Editor**

**Ershova, O.A.**

E-mail: transport.1@ngvrus.ru

Phone.: +7 (498) 657 29 76

**Subscription and Distribution Department**

E-mail: transport.2@ngvrus.ru

Phone.: +7 (498) 657 29 77

**Translation by**

**Khlystova A.I.**

**Computer imposition**

**Sherstyuk, I.V.**

**Editorial office address:**

PO Box 253, p. Razvilka, Leninsky r-n,

Moskovskaya obl, 142717

www.ngvrus.ru

Order number

Passed for press on 15.12.2014

Endorsed to be printed on 15.01.2015

Format 60x90 1/8 Circulation 3,000 copies Enamel paper

Offset printing, 10,5 conditional printed sheets

When copying materials, a reference «Alternative Fuel Transport» International  
Scientific and Technical Magazine is obligatory.

The editors are not responsible for accuracy of the information contained in  
advertising matter.

## CONTENTS

Gas fuel KAMAZ conquering Africa.....	3
Research and Practice Seminar Consumer's market of natural gas motor fuel: problem state and solutions approach».....	9
<b>Svetlana Belousova, Vladimir Zarubin, Yakov Osadchy</b> Numerical modeling of the thermal state of the metal-cylinder car in spending methane.....	12
<b>Vladimir Rudenko</b> Hogs running on natural gas .....	22
<b>Viktor Yerokhov</b> Efficiency of dimethylether's application on motor-service.....	30
<b>Valery Fomin</b> Systems of hydrogen storage on the vehicle board .....	45
«Gazprom gazenergoset» on innovation project to produce LNG in the Kama region .....	54
<b>Vladimir Markov, Vladimir Shumovsky, Viktor Akimov</b> Computational analysis of fuel injection process in a diesel engine running on water-fuel emulsion .....	56
CGVE (compressed gas vehicle equipment) and cylinders.....	66
Optimistic reviews of the International conference «LNG 2014» .....	67
Smooth movement of the International conference «CNG 2014» .....	70
Environmental responsibility rating of the RF's oil and gas companies.....	73
Johannesburg Prepares for NGV Buses.....	74
Increasing CNG Filling Stations in Delhi .....	75
Natural Gas A Solution for Israel's Transport Pollution .....	75
ClassNK Greenlights Niigata Dual-Fuel Engine Design .....	76
Abstracts of articles .....	77
Contributors to journal issue No 1 (43) 2015.....	78

# Газовый КАМАЗ – испытание Африкой пройдено!

С 28 декабря по 11 января по историческому маршруту гонки Париж – Дакар прошел международный ралли-марафон Africa Eco Race 2015. Впервые в гонке принял участие гибридный спортивный грузовик, работающий на смеси природного газа и дизельного топлива. Его заправку в пустыне обеспечивал передвижной газозаправщик «Газпром газомоторное топливо». Экипажу газового КАМАЗа предстояло доказать, что природный газ в моторе в экстремальных условиях африканского марафона ничуть не уступает нефтяным видам топлива.

Газовый КАМАЗ – это специальная модель спортивного грузового автомобиля, созданная командой «КАМАЗ-мастер» при поддержке ОАО «Газпром» и банка ВТБ для демонстрации преимуществ природного газа в качестве моторного топлива. В центральной части кузова на раме между топливным баком и кабиной КАМАЗа расположены четыре баллона с компримированным природным газом (КПГ). Вместе с ними в грузовике работает система трубопроводов, редуктор и специально доработанный топливный насос высокого давления. Благодаря применению природного газа достигается более полное сгорание топлива, что приводит к уменьшению дымности. Расход топлива сокращается на четверть, а его экономия составляет 15 %.



Экипаж газового КАМАЗа: Сергей Куприянов (справа), штурман Александр Куприянов (в центре) и механик Анатолий Танин

## Знаменательное событие

4

Участие газового КАМАЗа в африканском ралли символично – в 2013 году организаторы марафонов существенно ужесточили правила и ограничили допустимый уровень вредных выбросов от автомобилей. До этого эко-грузовику доводилось бороться за медали только в российских гонках, поэтому на Africa Eco Race состоялся его международный дебют.

Пилотом газового КАМАЗа выступил Сергей Куприянов, пресс-секретарь председателя правления ОАО «Газпром». В составе его экипажа – члены команды «КАМАЗ-мастер»: штурман Александр Куприянов и механик Анатолий Танин.

Чтобы обеспечить заправку автомобиля природным газом компания «Газпром газомоторное топливо» предоставила команде передвижной автомобильный газовый заправщик (ПАГЗ) «X-STORE» объемом 5,6 тыс. м<sup>3</sup>. Этого было достаточно более чем для 35 полных заправок баллонов грузовика. В составе колонны автомобилей технического сопровождения команды «КАМАЗ-мастер» газозаправщик преодолел более 6000 км и бесперебойно осуществлял заправку грузовика.



ПАГЗ «Титан 4» заправлял КАМАЗ в пустыне

На финише каждого этапа марафона в гибридный КАМАЗ заправляли 200 м<sup>3</sup> сжатого природного газа. Полной заправки автомобиля хватало на 600-700 км при работе двигателя в смешанном цикле – газодизельном. По словам экипажа, газовый КАМАЗ лучше «тянет на низких оборотах», а это было очень актуально для вязкого песка.

«Кривая зависимости мощности от оборотов получилась весьма интересной, – разъясняет пилот газового КАМАЗа Сергей Куприянов. – У стандартных дизелей ТМЗ достаточно узкий диапазон, при котором мотор достигает оптимальной мощности. При приближении к 2500 оборотам мощность начинает падать. Мы протестировали на стенде газодизельный вариант и увидели, что на плато предельной мощности он выходит быстрее – при 1700 или 1800 оборотах. При этом даже на этом уровне мощность превышает показатели дизельного двигателя. К тому же уходит резкий провал при приближении к максимальным оборотам».

Седьмой выпуск ралли-марафона Africa Eco Race обещал стать самым сложным за всю историю соревнований. Стоит отметить, что каждый год ландшафт Африки

значительно меняется, особенно в Марокко и мавританской пустыне вследствие сезонных проливных дождей. Поэтому как новичкам, так и опытным марафонцам было одинаково сложно и интересно вести борьбу в течение 12 этапов гонки.

Пройдя все необходимые административные процедуры и технические проверки в городе Сен-Сиприен (Франция), колонна марафонцев отправилась в Испанию, чтобы на пароме доплыть до марокканского порта Надор. Сойдя на берег 30 декабря спортсменам предстояло сразу же заводить моторы – стартовал первый этап ралли.

От команды «КАМАЗ-мастер» в этой гонке участвовали два экипажа: Антона Шибалова на дизельном КАМАЗе и, как уже говорилось выше, Сергея Куприянова на газовом грузовике. Всего в ралли приняли участие 29 мотогонщиков, 32 экипажа на внедорожниках и багги, а также 9 грузовиков. Забегая вперед скажем, что до финиша на Розовом озере в Дакаре (Сенегал) добралось чуть больше половины участников. Среди них – российские спортсмены команды VEB Racing Александр Григоров, пилот внедорожника Oscar O3 и мотогощица Анастасия Нифонтова на мотоцикле Husqvarna. Но обо всем по порядку.



Участники ралли

Перед началом гонки Сергей Куприянов отметил: «Ралли Africa Eco Race 2015 для газового КАМАЗа – это суровый экзамен. На трассе нашему автомобилю придется пройти пески, каменистые плато и саванны. Надо трезво оценивать свои силы и действовать адекватно ситуации. Хороший результат будет у тех, кто поедет стабильно». Этого правила экипаж строго придерживался первые два этапа. Газовый КАМАЗ шел в среднем темпе и приходил к финишу четвертым.

31 декабря спортсмены встретили в пустыне Новый год. В палатке команды «КАМАЗ-мастер» была установлена настоящая елка, звучали поздравления и пожелания успеха в новом году. Но засиживаться за праздничным столом было некогда – рано утром стартовал третий этап гонки, на котором спортсменам предстояло преодолеть первые большие дюны и пройти длинные скоростные участки.

В новый год – с новыми результатами. Антон Шибалов приходит первым, Сергей Куприянов – вторым. Можно сказать, что именно с этого этапа газовый КАМАЗ вступил в настоящую борьбу и «нажал на газ» на полную мощность.

Уже на пятом этапе эко-грузовик приходит первым. В результате по итогам пяти этапов команда «КАМАЗ-мастер» становится лидером зачета: экипаж Антона Шибалова на первом месте, экипаж Сергея Куприянова – на третьем. Газовое оборудование работает стабильно, спортсмены настроены побеждать.

4 января участники ралли провели день отдыха в городе Дахла (Марокко). Технические специалисты осматривали машины, а экипажи обсуждали результаты первой половины ралли: за плечами практически 3000 км, впереди – непредсказуемая Мавритания.



День отдыха на берегу Атлантического океана: механики осматривают машины

Мавританская пустыня действительно преподнесла сюрприз гонщикам – шестой этап пришлось отменить из-за песчаной бури. Сахара еще не раз показывала свой изменчивый характер. Тяжелые пески, обещанные организаторами, сделали свое дело – потери времени были у огромного числа участников. Досталось всем – даже техническому персоналу. На одном из переходов «закопался» газозаправщик, а потом, неподалеку от Сенегала, – автомобиль сопровождения казахстанской команды. Однако все закончилось благополучно, на помощь застрявшим пришла техника «КАМАЗ-мастера».

На «трассе» КАМАЗы старались не отрываться друг от друга, чтобы в случае необходимости помочь откопаться. Дюны невысокие, но кругом ямы и воронки, настоящие зыбучие пески. Экипажам постоянно приходилось регулировать давление в шинах и менять траекторию движения. Но мавританская пустыня все же покорилась российским гонщикам. Антон Шибалов финиширует первым на седьмом этапе, а Сергей Куприянов – первый на восьмом этапе.

На финише девятого этапа Сергей Куприянов рассказал журналистам: «Наша машина экспериментальная, мы к ней прислушиваемся, анализируем все характеристики. Заправляем сначала дизельное топливо, объем которого рассчитываем исходя из условий спецучастка, а затем заправляем газ по полной. Топлива меньше, чем у Антона (Шибалов, *прим. ред.*), заливаем процентов на тридцать. В песке постоянно идем на газе, а позавчера включили газ на liaзоне и сразу почувствовали, насколько машина разгоняется быстрее, потому что на liaзоне



«Зыбучие пески» Мавритании

турбина еще не работает, обороты небольшие и прямо с низких оборотов она выстреливает. В целом, я считаю, что эффект есть и очень неплохой».

И вот 12 этапов, марокканская и мавританская пустыни, и более 6000 км позади. Награждение победителей состоялось у легендарного Розового озера в Дакаре. Этот ралли-марафон действительно оказался трудным и захватывающим. Но несмотря на все сложности команда «КАМАЗ-мастер» на пьедестале: экипаж Антона Шибалова – на первом месте, экипаж Сергея Куприянова – на втором месте среди грузовиков. В общем зачете автомобилей у команды – второе и третье место соответственно.



Финиш на Розовом озере в Дакаре





Позади 6000 сложнейших километров. Сергей Куприянов:  
«Задача выполнена по верхней планке»

«Финиш на Розовом озере в Дакаре – это мечта любого, кто болеет ралли-рейдами. Коварство пустыни Сахара, мягкий песок Мавритании, острые камни Марокко, сотни и тысячи километров по бездорожью в величественных пейзажах западной Африки. Мы сделали это! И не только добрались до финиша, но и привезли великолепный для дебютантов такого марафона результат. Вторые в грузовиках и третьи в абсолюте среди всей четырехколесной техники. Задача выполнена по верхней планке. Работа всей команды, включая экипаж газозаправщика, механиков, группы сопровождения, позволили создать этот результат», – прокомментировал итоги гонки Сергей Куприянов.

Газовый КАМАЗ прошел «экзамен» Африкой и готов к новым испытаниям!



## Научно-практический семинар «Потребительский рынок газомоторного топлива: состояние, проблемы и пути их решения»

4 декабря 2014 года в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» состоялся научно-практический семинар «Потребительский рынок газомоторного топлива: состояние, проблемы и пути их решения», организатором которого стала Национальная газомоторная ассоциация при поддержке ООО «Газпром газомоторное топливо», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», ОАО «Газпром газэнергосеть», ОАО «Удмуртавтотранс», ЗАО «Агентство Прямых Инвестиций» и Представительства Е. ОН Глобал Коммодитиз СЕ (Германия).



Перед началом семинара: Юлия Дрыгина (ООО «Газпром ВНИИГАЗ») и Игорь Борисов (генеральный директор ООО «Икстрейд Энерджи»)

В работе семинара приняли участие представители научных и проектных организаций, газотранспортных структур, региональных автотранспортных предприятий, органов по сертификации, производителей газозаправочного и газоиспользующего оборудования, автопроизводителей из России, Германии, Италии.

Работу семинара открыл советник генерального директора ООО «Газпром ВНИИГАЗ», член-корреспондент РАН А.И. Гриценко, который особо отметил заслугу отраслевой науки в формировании методологических основ создания отечественной газомоторной

индустрии. Участников семинара приветствовал заместитель генерального директора ООО «Газпром ВНИИГАЗ» А.З. Шайхутдинов.

Первым на семинаре прозвучал доклад директора Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительного директора НГА С.В. Люгая.

Он отметил, что совершенствование транспортной системы России как ключевого фактора социально-экономического развития страны направлено на повышение качества транспортных услуг, снижение совокупных издержек общества, зависящих от транспорта, повышение конкурентоспособности отечественной транспортной системы, усиление инновационной, социальной и экологической направленности развития транспортной отрасли. И именно внедрение газомоторной техники, – как сказал С.В. Люгай, – способствует совершенствованию отечественной транспортной системы по всем этим направлениям.

Задача перехода на газомоторное топливо (ГМТ) относится к числу приоритетных для транспортного комплекса Российской Федерации, – подчеркнул Станислав Владимирович. – Темпы перехода различных видов транспорта



Выступает А.З. Шайхутдинов



Президиум семинара

и техники специального назначения на использование газомоторного топлива во многом зависят как от имеющегося научно-технического и производственного задела отраслей транспортного, дорожно-коммунального и сельскохозяйственного машиностроения, так и от наличия в стране газозаправочной и сервисной инфраструктуры. Среди всех видов транспорта наиболее высокие темпы перехода на использование газомоторного топлива могут быть обеспечены на автомобильном, который выполняет почти 60 % общего объема пассажирских перевозок и более 45 % общего объема перевозок грузов. В настоящее время на газомоторном топливе работает менее 1 % автотранспортных средств, зарегистрированных в РФ. А ведь автомобильный транспорт обеспечивает перевозку грузов для всех отраслей экономики страны. На автотранспортные издержки приходится от 10 до 30 % в себестоимости многих видов товаров и услуг. Поэтому внедрение ГМТ могло бы положительно сказаться в целом на экономике страны.

Ведущий инженер «Кавказавтогаза» ООО «Газпром трансгаз Ставрополь» Ю.Н. Талеганов уделит внимание действующей и вводимой в действие нормативно-технической документации (НТД), регламентирующей эксплуатацию и заправку газобаллонных автомобилей на АГНКС. По его мнению, многие положения НТД необходимо пересмотреть, в частности

касательно отмены проверки документов у водителей при заправке на АГНКС.

Ю.Н. Талеганов отметил, что во вновь вводимых нормативно-технических документах в области перевода автотранспорта на КПП и заправки газобаллонных автомобилей на АГНКС содержатся противоречия и недостатки, которые следует устранить. По его мнению, вновь вводимые в действие НТД должны проходить необходимую экспертизу с участием представителей всех заинтересованных сторон.

Тему состояния технической документации по газобаллонному оборудованию продолжили генеральный директор ООО «Региональный центр сертификации и мониторинга качества» В.И. Строганов и руководитель испытательной лаборатории ООО «ТЭДЭС» П.Г. Вишняков.

Генеральный директор ОАО «Удмуртавтотранс» А.Ю. Ахметшин посвятил свое выступление проекту перевода общественного транспорта Удмуртской Республики на сжатый природный газ (КПП). ОАО «Удмуртавтотранс» и ОАО «ИПОПАТ» – это 8 автобусных парков, свыше 4000 работников, более 900 автобусов большого и среднего классов, 370 маршрутов городского, пригородного и межмуниципального сообщения, более 140 млн перевозимых пассажиров в год. Основная проблема, которая сегодня стоит перед коллективами, – снижение рентабельности бизнеса. Целью проекта является перевод 70 % общественного транспорта Удмуртии на использование КПП в качестве моторного топлива.

Для достижения поставленной цели необходимо, в частности, осуществить перевод 570 автобусов на КПП, привести инфраструктуру предприятия в соответствие с требованиями НТД, предъявляемыми при эксплуатации, ремонте и обслуживании ГБА, развить сеть сервисных центров по установке, ремонту и техническому обслуживанию ГБО. Планом проекта предусмотрено к 2020 г.

строительство новых заправочных станций и перевод на КПП 70 % автобусного парка.

Также на семинаре обсуждались следующие темы:

- опыт создания систем газоподготовки для газовых локомотивов, работающих на СПГ, результаты их предварительных испытаний в условиях эксплуатации (В.Ф. Руденко, С.П. Горбачев, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»);
- мировой опыт развития рынка газомоторного топлива: меры государственного регулирования, модели и этапы развития (Н.К. Симонян, ЗАО «Агентство Прямых Инвестиций»);
- автопробег «Голубой коридор – 2014»: европейский опыт использования природного газа в качестве моторного топлива (Е.Н. Пронин, ООО «Газпром экспорт»);
- требования безопасной эксплуатации автомобильных транспортных средств на природном газе (А.Г. Малюга, ООО «РариТЭК»);
- проблемы и перспективы потребительского рынка газомоторного топлива в Германии (А. Шуманн, Э.ОН Глобал Коммодитиз СЕ);
- коммерческая эффективность использования КПП, СПГ и СУГ в мобильной сельскохозяйственной технике (Г.С. Савельев, ФГБНУ ВИМ) и другие темы.

По отзывам участников, семинар «Потребительский рынок ГМТ» закрепил положительный опыт аналогичных научно-практических мероприятий, основной целью которых является взаимодействие экспертов проектных и научных организаций, работающих над проблемами газомоторного рынка, с представителями органов государственной власти и профессиональным сообществом. На семинаре состоялся обмен опытом по реализации инфраструктурных проектов, способствующих расширению использования природного газа в качестве моторного топлива.



Вручение свидетельства о членстве в НГА: исполнительный директор НГА Станислав Люгай (справа) и заместитель директора компании Gazprom EP International B.V. Валерий Комбаров

Семинар привлек многочисленных участников не только актуальными выступлениями спикеров, но и возможностью в формате панельной дискуссии обсудить ключевые проблемы действующей и вводимой в действие нормативно-технической документации, актуальность мер государственного регулирования потребительского рынка ГМТ, коммерческую эффективность использования альтернативного топлива и др.

В роли экспертов выступили главный научный сотрудник ВНИИПО МЧС РФ, д.т.н. В.Л. Карпов, главный научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», профессор, д.т.н. С.П. Горбачев, профессор МАДИ, к.т.н. Ю.В. Панов и генеральный директор ООО «Региональный центр сертификации и мониторинга качества» В.И. Строганов.

Приоритетность общегосударственной задачи перехода на использование транспортом газомоторного топлива обуславливает активное формирование профессиональной среды, которая хорошо понимает эту задачу и всерьез содействует ее решению, – таков лейтмотив и один из положительных выводов из работы научно-практического семинара, организованного Национальной газомоторной ассоциацией.

# Численное моделирование теплового состояния металлокомпозитного автомобильного баллона при расходовании метана

**С.Ю. Белоусова**, ведущий инженер ЗАО НПП «Маштест»,  
**В.С. Зарубин**, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**Я.Г. Осадчий**, генеральный директор ЗАО МАШТЕСТ, д.т.н.

Статья является продолжением работы [1].

Разработана математическая модель теплового состояния типовых автомобильных баллонов, которая использована при численном моделировании изменения давления в процессе расходования метана из металлокомпозитного баллона. Процесс сопровождается существенным снижением температуры метана в баллоне и неравномерным охлаждением основных силовых элементов конструкции, что влияет на их механическое взаимодействие и может сократить эксплуатационный ресурс баллона. Рассмотрен металлокомпозитный баллон с несущим металлическим лейнером, армированным композиционным материалом по наружной поверхности обечайки (второй конструктивный тип). При моделировании использован уточненный вариант уравнения состояния метана, наиболее близко коррелирующий с экспериментальными данными. Представлены результаты численного моделирования при различных температурах окружающего воздуха и нескольких значениях расхода метана.

### Ключевые слова:

численное моделирование, тепловая модель баллона, уравнение состояния метана, теплообмен при естественной конвекции.

**О**сновную часть используемого на транспорте сжатого природного газа (КПГ) составляет метан. При расходовании метана из автомобильного баллона с высоким начальным давлением уменьшается температура КПГ и возрастает темп падения давления в баллоне, что необходимо учитывать при настройке регулирующей аппаратуры двигателя. При этом происходит снижение температуры баллона, что при повышенной влажности окружающего воздуха может вызвать на наружной поверхности осадок влаги и даже

иней. Наличие влаги на элементах конструкции баллона, подверженных коррозии, приводит к ускорению коррозионных процессов и сокращению эксплуатационного ресурса баллона.

Снижение температуры металлокомпозитного баллона вызывает различные температурные деформации лейнера и армирующих слоев, что влияет на условия механического взаимодействия между этими элементами и может стать причиной уменьшения несущей способности конструкции. При многократном повторении циклов заполнения и

опорожнения баллона возникающие в элементах его конструкции температурные напряжения приводят к накоплению дополнительных повреждений в материалах и, как следствие, к снижению циклической прочности, также влияющей на эксплуатационный ресурс баллона.

В силу указанного влияния процесса расходования метана из автомобильного баллона на условия работы его конструкции возникает необходимость в комплексном количественном анализе связи между расходом метана, его давлением в баллоне и тепловым состоянием баллона. Такой анализ можно провести путем численного моделирования, используя ранее разработанные варианты тепловой модели для трех наиболее распространенных конструктивных типов автомобильных баллонов [1].

Одной из особенностей этого анализа является то, что метан при параметрах его состояния, характерных для основных режимов эксплуатации автомобильных баллонов для КПП, не подчиняется уравнению Клапейрона – Менделеева в виде [2], описывающему состояние совершенных газов и при фиксированном значении температуры  $T$  устанавливающему линейную связь между давлением  $p$  и плотностью  $\rho$  метана. Использование уравнения Ван-дер-Ваальса для реальных газов [3, 4], включающего два дополнительных параметра, и рекомендованного в монографии [5] двухпараметрического уравнения Редлиха – Квонга также приводит к значительным вычислительным погрешностям [1]. Представленные ниже результаты количественного анализа применительно к металлокомпозитному баллону с несущим металлическим лейнером, армированным композиционным материалом только по наружной поверхности обечайки, получены с использованием уточненного варианта уравнения состояния метана [6].

## Математическая модель изменения давления в баллоне

При расходовании метана его давление  $p(t)$  в баллоне в текущий момент времени  $t$  при помощи уравнения состояния можно однозначно представить как функцию текущих значений плотности  $\rho(t)$  метана и его температуры  $T(t)$ . Плотность метана при фиксированной вместимости  $V$  баллона зависит от режима расходования, который определяется значением  $\dot{m}(t)$  расхода метана в единицу времени. Тогда можно записать

$$\rho(t) = \frac{m(t)}{V} = \rho_0 - \frac{1}{V} \int_0^t \dot{m}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

с текущим значением массы метана в баллоне

$$m(t) = m_0 - \int_0^t \dot{m}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  и  $m_0$  – соответственно плотность и масса метана в момент времени  $t=0$ , который принимается за начальный в процессе опорожнения баллона.

Для установления зависимости от времени температуры  $T(t)$  метана в баллоне необходимо использовать закон сохранения энергии (первый закон термодинамики [7]) для текущего значения  $m(t)$  массы метана в баллоне, что позволяет записать обыкновенное дифференциальное уравнение [1, 8]

$$C \frac{dT}{dt} = Q - z R_m T \dot{m}, \quad (3)$$

где  $C = c_v m$  – полная теплоемкость метана, Дж/К;  $c_v$  – удельная массовая теплоемкость метана при постоянном объеме (изохорическая теплоемкость, графика зависимости которой от температуры при различных значениях плотности, построенные по данным работы [6], представлены в работе [1]), Дж/(кг·К);  $Q$  – тепловой поток, подводимый к метану от внутренней поверхности лейнера баллона, Вт;  $z$  – безразмерный коэффициент сжимаемости метана;  $R_m$  – газовая постоянная (для метана  $R_m \approx 518,3$  Дж/(кг·К) [5]).

Коэффициент  $z$  сжимаемости метана зависит от параметров  $p$ ,  $\rho$  и  $T$ , связанных между собой уравнением состояния метана. Обычно этот коэффициент для большинства газов представляют в виде графических зависимостей от  $p$  при фиксированных значениях  $T$  [3, 4]. Для метана такие зависимости построены в работе [1] с использованием уточненного варианта уравнения состояния [6]. Однако для проведения количественного анализа в данной работе возникла необходимость при помощи этого варианта уравнения состояния исключить  $p$  из числа аргументов зависимости  $z(p, T)$ , преобразовав ее к виду  $z(\rho, T)$ , поскольку плотность  $\rho$  метана в баллоне в текущий момент времени  $t$  можно непосредственно вычислить по формуле (1). Температуру  $T$  метана как второй аргумент зависимости  $z(\rho, T)$  следует найти, используя тепловую модель баллона рассматриваемого конструктивного типа [1]. В итоге для вычисления давления метана в баллоне получим формулу

$$p = z(\rho, T) \rho R_m T. \quad (4)$$

## Тепловая модель металлокомпозитного баллона

Численное моделирование изменения давления в баллоне и охлаждения его конструкции при расходе метана проведено применительно к достаточно распространенному конструктивному типу цилиндрических автомобильных баллонов для КПП с несущим металлическим лейнером, армированным композиционным материалом лишь по наружной поверхности цилиндрической обечайки [9, 10]. Рассмотрен баллон вместимостью  $51 \text{ л} = 0,051 \text{ м}^3$  (рис. 1).

Первый этап построения тепловой модели баллона состоит в условном разделении его конструкции на отдельные элементы и вычислении полных теплоемкостей этих элементов. В конструк-

ции рассматриваемого баллона целесообразно выделить в качестве сосредоточенных теплоемких масс обечайку и днища лейнера, а также армирующий слой на обечайке лейнера. Кроме того, в модели необходимо учесть в виде сосредоточенной теплоемкой массы находящийся в баллоне метан. Каждой теплоемкой массе на расчетной схеме модели (рис. 2) соответствует светлый кружок, около которого указаны полная теплоемкость выделенного элемента и его температура:  $C$  и  $T$  соответствуют метану,  $C_1$  и  $T_1$  – обечайке лейнера,  $C_2$ ,  $T_2$  и  $C_3$ ,  $T_3$  – соответственно левому и правому днищам лейнера,  $C'_1$  и  $T'_1$  – армирующему слою на обечайке лейнера. В  $C_2$  нужно включить полную теплоемкость штуцера с накопником трубопровода. Следует иметь в виду, что полная теплоемкость метана  $C = c_v m$  зависит от его температуры и плотности [1, 6] и может существенно изменяться в процессе опорожнения баллона в силу изменения массы  $m$  метана, определяемой соотношением (2).

На втором этапе построения модели необходимо вычислить термические сопротивления, связывающие между собой сосредоточенные теплоемкие массы и обозначенные на рис. 2 литерой  $R$ . Для тонкостенного металлического лейнера, выполненного из достаточно теплопроводной стали 30ХМА, допустимо пренебречь изменением температуры по его толщине. Поэтому температуры

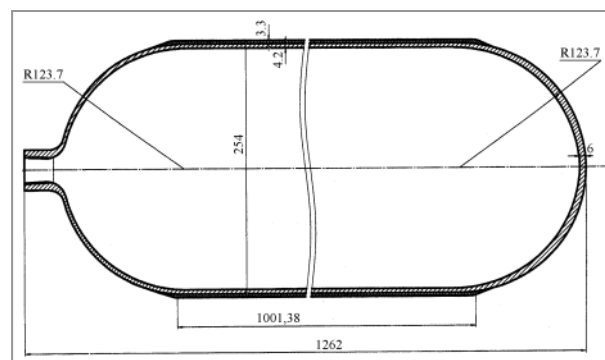
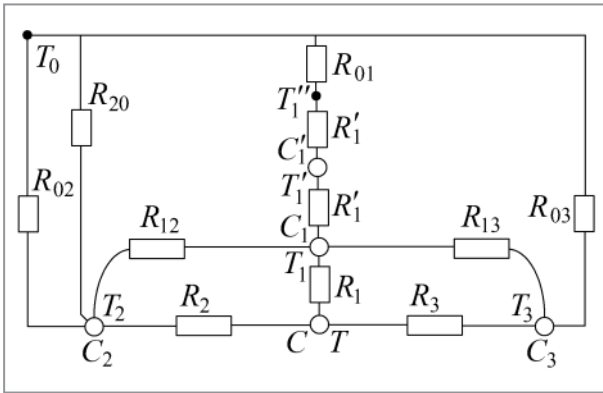


Рис. 1. Осевое сечение металлокомпозитного баллона второго конструктивного типа

$T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  соответствующих сосредоточенных теплоемких масс можно считать совпадающими со средними температурами внутренней и наружной поверхностей обечайки лейнера и его днищ. Тогда значения термических сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  будут зависеть лишь от интенсивности теплообмена метана соответственно с обечайкой лейнера и с его левым и правым днищами.



**Рис. 2.** Расчетная схема тепловой модели металлокомпозитного баллона второго конструктивного типа

Термические сопротивления  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  и  $R_{03}$  связывают наружные поверхности армирующего слоя на обечайке и днищ лейнера с окружающим воздухом, имеющим заданную температуру  $T_0$  (см. рис. 2), которая может изменяться во времени. Значения этих сопротивлений зависят от интенсивности теплообмена на указанных поверхностях, на которую оказывают влияние температуры поверхностей теплообмена (на рис. 2 это температуры  $T''_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ). Термическое сопротивление  $R_{20}$  связывает штуцер в левом днище непосредственно с окружающим воздухом через подведенный к баллону трубопровод. Этот трубопровод в тепловом отношении можно представить как достаточно длинный тонкий стержень, температура торца которого совпадает с температурой  $T_2$  штуцера в левом днище. На наружной поверхности трубопровода происходит конвективный

теплообмен с окружающим воздухом с заданной температурой  $T_0$ , а на его внутренней поверхности – конвективный теплообмен с метаном.

Значения остальных термических сопротивлений зависят от геометрических размеров элементов конструкции баллона и коэффициентов теплопроводности материала этих элементов. Например,

$$R'_1 = (h'_1/\lambda'_1)/(2\pi(D+h'_1)L)[1],$$

где  $h'_1$  – толщина армирующего слоя на наружной поверхности обечайки;  $\lambda'_1$  – коэффициент теплопроводности армирующего материала;  $D$  и  $L$  – наружный диаметр обечайки лейнера и ее длина соответственно.

На заключительном этапе построения тепловой модели баллона необходимо составить уравнения теплового баланса для всех выделенных сосредоточенных теплоемких масс. Эти уравнения образуют систему из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений, принимающую с учетом уравнения (3) следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} C \frac{dT}{dt} &= z(\rho, T) R_m T \dot{m} + \frac{T_1 - T}{R_1} + \frac{T_2 - T}{R_2} + \frac{T_3 - T}{R_3}, \\ C_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{T - T_1}{R_1} + \frac{T'_1 - T_1}{R'_1} + \frac{T_2 - T_1}{R_{12}} + \frac{T_3 - T_1}{R_{13}}, \\ C'_1 \frac{dT'_1}{dt} &= \frac{T_1 - T'_1}{R'_1} + \frac{T_0 - T'_1}{R'_1 + R_{01}}, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{T - T_2}{R_2} + \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} + \frac{T_0 - T_2}{R_{20}} + \frac{T_0 - T_2}{R_{02}}, \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{T - T_3}{R_3} + \frac{T_1 - T_3}{R_{13}} + \frac{T_0 - T_3}{R_{03}}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Для однозначного решения этой системы необходимо в момент времени  $t=0$ , принимаемый за нуль отсчета, задать начальные значения температур всех пяти сосредоточенных теплоемких масс. Текущее значение температуры наружной поверхности армирующего слоя на обечайке лейнера зависит от текущих значений  $T_0$  и  $T'_1$  и равно  $T''_1 = (T_0 R'_1 + T'_1 R_{01}) / (R'_1 + R_{01})$ . (6)



## Условия теплообмена в баллоне и на его наружной поверхности

16

Для вычисления значений термических сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , входящих в правые части уравнений системы (5), необходимо использовать зависимости, определяющие интенсивность теплообмена метана с участками внутренней поверхности оболочки баллона. Теплообмен в замкнутом объеме баллона происходит по механизму естественной конвекции [11], и на его интенсивность влияют разность температур метана и поверхности теплообмена, давление метана и его теплофизические характеристики. Количественно интенсивность конвективного теплообмена характеризует коэффициент теплообмена  $\alpha$ , который в критериальных зависимостях, полученных обработкой экспериментальных данных, входит в безразмерный критерий (число) Нуссельта  $Nu = \alpha l / \lambda$ , где  $l$  – характерный размер поверхности теплообмена,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды (в данном случае метана). Для полости горизонтально расположенного баллона в качестве  $l$  можно принять внутренний диаметр  $d$  его цилиндрической обечайки.

Одна из наиболее универсальных критериальных зависимостей, позволяющая вычислить среднее по поверхности теплообмена значение  $\alpha$  при естественной конвекции, имеет вид [11, 12]

$$Nu = C_* Ra^n, \quad n < 1, \quad (7)$$

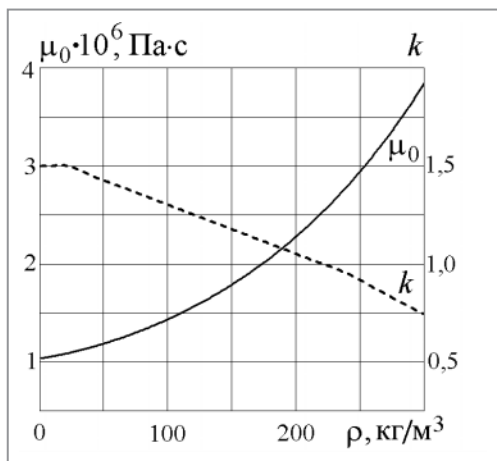
где  $Ra = g_0 \beta |\Delta T| l^3 (\rho/\mu)^2 Pr$  – критерий (число) Рэлея;  $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения;  $|\Delta T|$  – абсолютное значение разности температур среды и поверхности теплообмена;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости среды;  $Pr = c_p / (\mu \lambda)$  – критерий (число) Прандтля;  $c_p$  – удельная массовая теплоемкость среды при постоянном давлении (изобарическая теплоемкость).

Значения зависящих от температуры параметров  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  и  $Pr$  следует подставлять в формулу (7) соответствующими среднему значению температур среды и поверхности теплообмена. Значения коэффициента  $C_*$  и показателя степени  $n$  в этой формуле зависят от значения критерия Рэлея:  $C_* = 1,18$  и  $n = 1/8$  при  $10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2$ ;  $C_* = 0,548$  и  $n = 1/4$  при  $5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7$ ;  $C_* = 0,135$  и  $n = 1/3$  при  $2 \cdot 10^7 < Ra < 10^{13}$ . Первый промежуток значений  $Ra$  соответствует режиму псевдо-теплопроводности, второй – ламинарному режиму течения среды в пограничном слое на поверхности теплообмена, а третий – переходному к турбулентному и развитому турбулентному режимам [11].

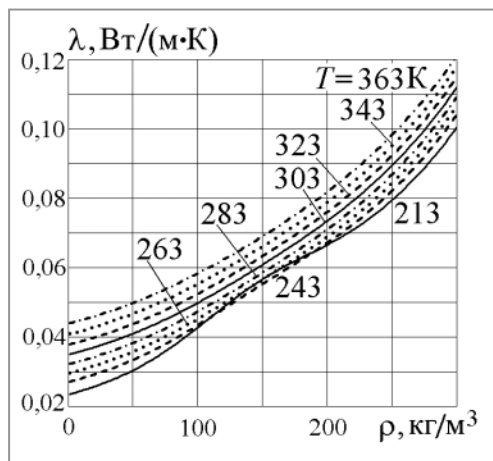
Необходимо отметить, что если речь идет о метане, то параметры  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $Pr$  и  $\beta$  зависят не только от температуры, но и от его плотности или давления. Модифицируя известную формулу Сазерленда [3], можно записать  $\mu(\rho, T) = 435 \mu_0(\rho) (T/273)^{k(\rho)} / (T + 162)$ , (8) где значения температуры  $T$  должны быть в кельвинах.

Зависимости  $\mu_0(\rho)$  и  $k(\rho)$  приведены на рис. 3. Для коэффициента теплопроводности метана аналогичная модификация формулы Сазерленда оказалась малоприменимой. Зависимость  $\lambda(\rho, T)$  представлена на рис. 4, а на рис. 5 – зависимость  $Pr(\rho, T)$ . Поскольку  $\beta = (1/\nu) dv/dT$ , где  $\nu = 1/\rho$  – удельный объем метана, температурный коэффициент объемного расширения можно вычислить по формуле  $\beta = -(1/\rho) d\rho/dT$ . Зависимость  $\beta(\rho, T)$  приведена на рис. 6.

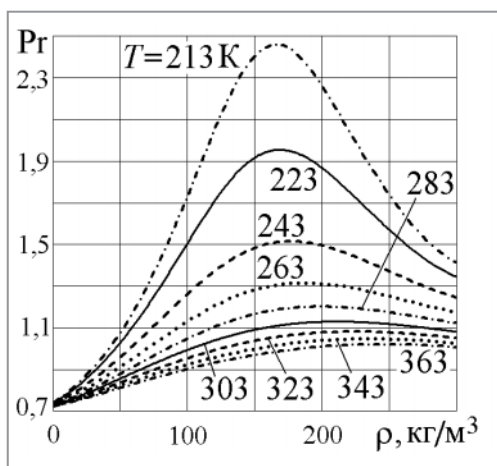
При температуре  $T = 273 \text{ К}$  и плотности  $\rho = 10 \text{ кг/м}^3$  метана, что соответствует давлению  $p \approx 1,37 \text{ МПа}$ , близкому по значению к остаточному давлению в баллоне перед его очередным заполнением, комплекс параметров следующий:  $G = g_0 \beta (\rho/\mu)^2 Pr \approx 5,48 \cdot 10^{10}$ . Для рассматриваемого баллона внутренний диаметр обечайки  $d = 0,239 \text{ м}$  (см. рис. 1), что даже при значении  $|\Delta T| = 1 \text{ К}$  дает следующую оценку:  $Ra = G d^3 |\Delta T| \approx 7,49 \cdot 10^8$ .



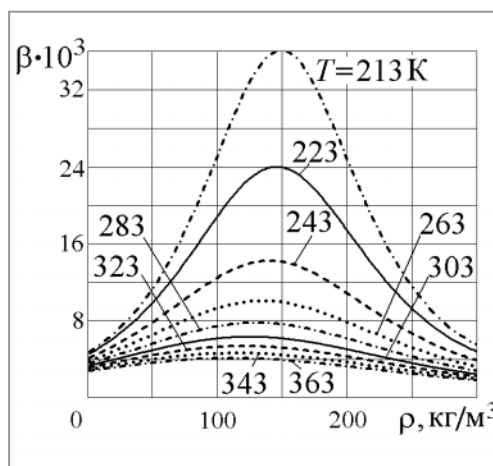
**Рис. 3.** Графики зависимости параметров расчетной формулы для динамического коэффициента вязкости метана от его плотности



**Рис. 4.** Зависимости коэффициента теплопроводности метана от его плотности при различных значениях температуры



**Рис. 5.** Зависимости критерия Прандтля для метана от его плотности при различных значениях температуры



**Рис. 6.** Зависимости температурного коэффициента объемного расширения метана от его плотности при различных значениях температуры

Эта оценка означает, что в данном случае режим течения в пограничном слое на поверхности теплообмена можно считать турбулентным и в формуле (7) следует принять  $C_* = 0,135$  и  $n = 1/3$ . При увеличении плотности метана вплоть до наибольшего для данного баллона эксплуатационного значения 19,6 МПа значение  $Ra$  будет возрастать.

Если отсутствует обдув баллона окружающим воздухом, то теплообмен на его

наружной поверхности также определяется механизмом естественной конвекции. Коэффициент теплообмена и в этом случае можно вычислить по формуле (7), используя известные теплофизические характеристики воздуха. Для горизонтально расположенного баллона в качестве определяющего размера  $l$  можно принять его наружный диаметр  $D_*$ . У рассматриваемого баллона  $D_* = 0,254$  м (см. рис. 1). При температуре  $T_0 = 273$  К и атмосферном

давлении 0,1013 МПа для воздуха комплекс параметров такой:  $G=g_0\beta(\rho/\mu)^2Pr\approx 1,44\cdot 10^8$  [11]. Тогда при значении  $|\Delta T|=1$  К получаем оценку  $Ra=G D_*^3|\Delta T|\approx 2,36\cdot 10^6$ , что соответствует ламинарному режиму течения в пограничном слое. При увеличении значения  $|\Delta T|$  и снижении температуры  $T_0$  окружающего воздуха (при этом возрастает значение  $G$ ) возможен переход к турбулентному режиму течения в этом слое.

## Результаты численного моделирования

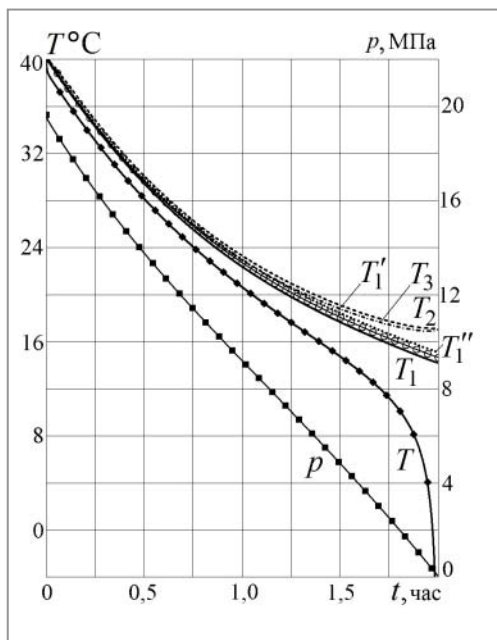
Для рассматриваемой конструкции баллона при проведении численного моделирования были приняты следующие значения теплофизических характеристик конструкционных материалов: плотность, удельная массовая теплоемкость и коэффициент теплопроводности – стали 30ХМА [13, 14] соответственно  $7820 \text{ кг/м}^3$ ,  $461 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $48 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и армирующего стеклопластика соответственно  $1258 \text{ кг/м}^3$ ,  $1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $0,43 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Масса конструкции баллона (см. рис. 1) равна  $33,9 \text{ кг}$ , а масса штуцера из стали с удельной массовой теплоемкостью  $503 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  составляет  $0,26 \text{ кг}$ . Оценки термического сопротивления  $R_{20}$  (см. рис. 2), связывающего в тепловом отношении через трубопровод левое днище лейнера с окружающим воздухом, показывают, что влиянием этого сопротивления можно пренебречь, поскольку оно на два порядка превышает значение термического сопротивления  $R_{02}$ .

Результаты моделирования получены путем численного решения системы (5) обыкновенных дифференциальных уравнений с учетом формул (4), (6)-(8) и информации о теплофизических характеристиках метана, представленных на рис. 3-6. При моделировании в целях сравнения результатов расчетов выбран одинаковый период расходования метана из баллона, равный двум часам. Предполагается, что этот период может соответствовать пробегу автомобиля в  $150\dots 200 \text{ км}$ .

В качестве базового для расхода метана выбрано значение  $\dot{m}=0,001 \text{ кг/с}$ . При таком расходе баллон с начальным давлением  $19,6 \text{ МПа}$  при начальной температуре метана  $313 \text{ К}$  ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и его запасе  $7,25 \text{ кг}$  за два часа опорожняется практически полностью (рис. 7). На рис. 7-12 сплошная линия с квадратами соответствует зависимости давления  $p$  в баллоне от времени  $t$ , а остальные кривые – изменению температуры метана (сплошная линия с ромбами) и температур элементов конструкции баллона (см. рис. 1 и 2):  $T_1$  – обечайки лейнера (сплошная линия);  $T_2$  и  $T_3$  – левого и правого днищ лейнера (соответственно штриховая и штрихпунктирные линии);  $T'_1$  – средняя температура по толщине армирующего слоя на обечайке лейнера (сплошная линия со светлыми кружками);  $T''_1$  – температура наружной поверхности армирующего слоя (пунктирная линия).

В начальный период опорожнения баллона (см. рис. 7) при достаточно большой плотности метана в силу высокой интенсивности его теплообмена с лейнером снижение температур характерных элементов конструкции баллона обуславливает уменьшение температуры метана. При этом роль теплообмена баллона с окружающим воздухом сравнительно мала. Но в заключительный период опорожнения вследствие малой плотности метана интенсивность теплообмена на внутренней поверхности лейнера падает и возрастает роль теплообмена с окружающим воздухом благодаря возникшей значительной разнице между его температурой и температурами элементов конструкции баллона. Это приводит к существенному различию температур метана и конструкции баллона.

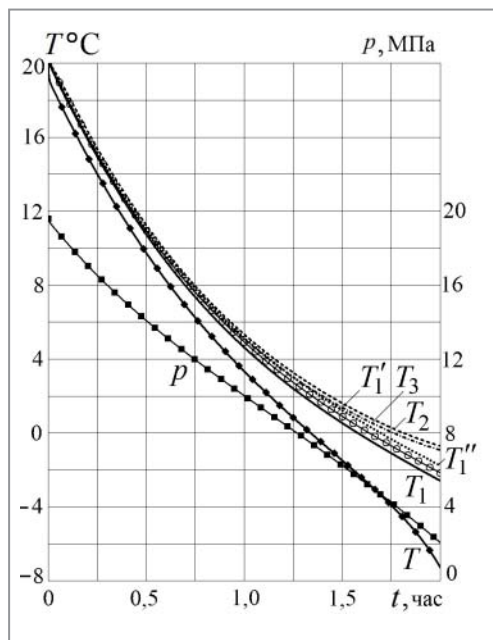
На рис. 8 представлены результаты моделирования при начальной температуре  $293 \text{ К}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), соответствующей запасу метана в баллоне  $8,15 \text{ кг}$ , и прежнем значении  $\dot{m}=0,001 \text{ кг/с}$ . В этом случае остаточное давление в баллоне составляет примерно  $2 \text{ МПа}$ , что приводит



**Рис. 7.** Результаты моделирования опорожнения баллона при начальном запасе метана 7,25 кг и его расходе 0,001 кг/с

к сохранению достаточно высокого уровня интенсивности теплообмена метана с лейнером в течение всего двухчасового периода расходования метана. В результате к концу этого периода происходит переход температур характерных элементов конструкции баллона в область отрицательных значений по шкале Цельсия. Если уменьшить вдвое расход метана, то остаточное давление в баллоне составит около 10 МПа (см. рис. 9). При этом в силу более высокого уровня интенсивности теплообмена метана с лейнером различие температур метана и характерных элементов конструкции баллона по сравнению с предыдущим вариантом расчета уменьшается, а снижение расхода метана примерно вдвое уменьшает и общее падение температур.

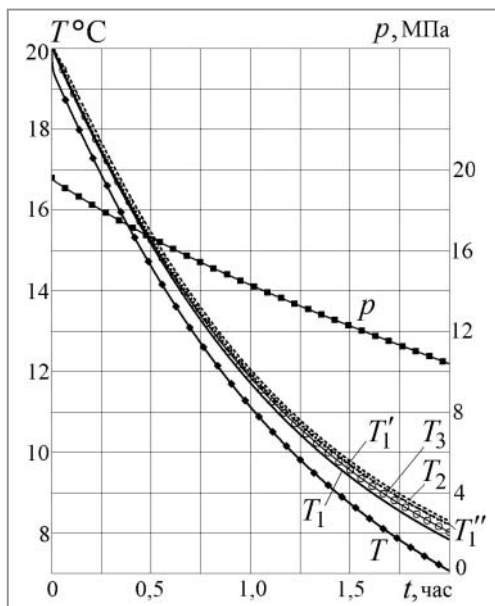
При начальных температуре 273 К (0 °С) и давлении 19,6 МПа запас метана составляет 9,23 кг. Результаты моделирования при расходе метана  $\dot{m}=0,001$  кг/с приведены на рис. 10. В этом случае остаточное давление превышает 4 МПа, что также обеспечивает высокий уровень



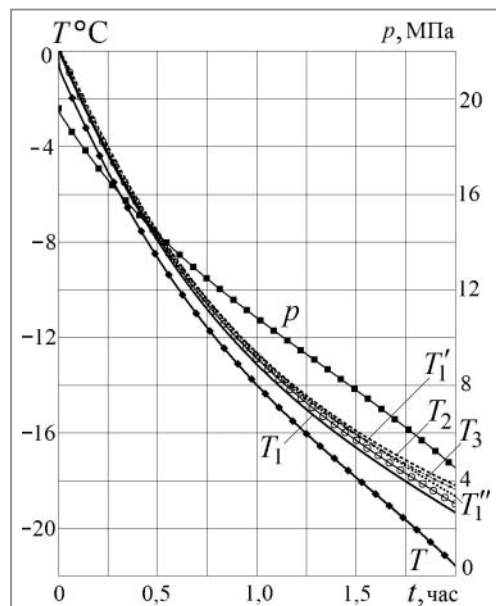
**Рис. 8.** Результаты моделирования при запасе метана 8,15 кг и его расходе 0,001 кг/с

интенсивности теплообмена метана с лейнером в течение всего двухчасового периода опорожнения баллона. Из сравнения с рис. 8 следует, что при одинаковых значениях расхода метана общее снижение температур метана и конструкции баллона несколько ниже в силу меньшей степени падения давления за период опорожнения баллона.

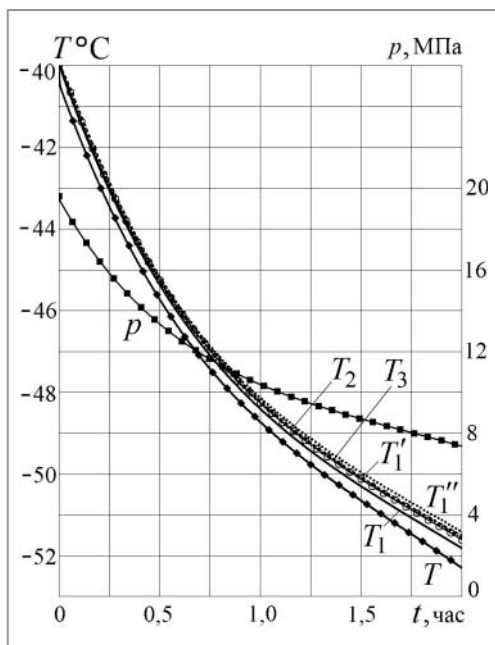
На рис. 11 и 12 представлены результаты моделирования при начальной температуре 233 К (-40 °С), которая позволяет увеличить запас метана в баллоне до 12,92 кг. В силу высокого уровня интенсивности теплообмена метана и лейнера в течение всего периода опорожнения баллона с расходом  $\dot{m}=0,001$  кг/с отличие температуры метана от температур характерных элементов конструкции баллона не превышает одного градуса (см. рис. 11). Значительный начальный запас метана позволяет форсировать процесс его расходования. При значении  $\dot{m}=0,0017$  кг/с интенсивность теплообмена убывает к концу периода опорожнения баллона, что приводит к



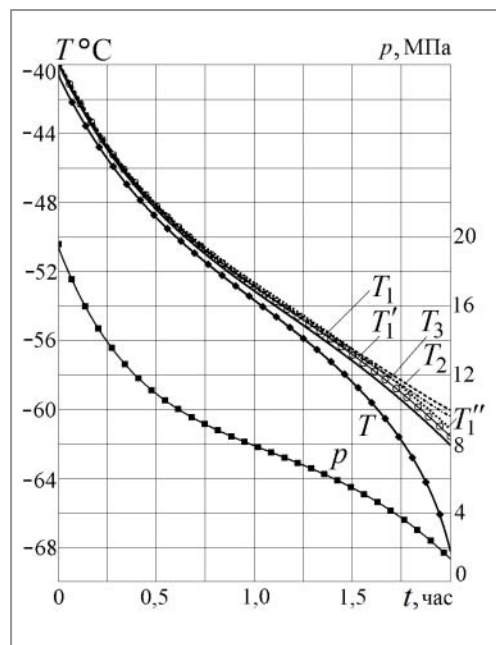
**Рис. 9.** Результаты моделирования при запасе метана 8,15 кг и его расходе 0,0005 кг/с



**Рис. 10.** Результаты моделирования при запасе метана 9,23 кг и его расходе 0,001 кг/с



**Рис. 11.** Результаты моделирования при запасе метана 12,92 кг и его расходе 0,001 кг/с



**Рис. 12.** Результаты моделирования при запасе метана 12,92 кг и его расходе 0,0017 кг/с

увеличению до 7...8° разности температур оболочки баллона и метана (см. рис. 12).

Представленные результаты численного моделирования дают возможность

выявить влияние температуры окружающего воздуха и темпа расходования метана из металлокомпозитного автомобильного баллона на изменения

его теплового состояния и внутреннего давления. При моделировании использована ранее разработанная тепловая модель металлокомпозитного баллона, позволяющая учесть основные особенности его конструкции и условия теплообмена с метаном и окружающим воздухом. Результаты моделирования могут быть использованы для оценки влияния

различных климатических условий эксплуатации металлокомпозитного баллона на его ресурс и учтены при уточнении режимов испытаний таких баллонов.

*Работа выполнена по гранту НШ-1432.2014.8 программы Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ.*

## Литература

1. Белоусова С.Ю., Зарубин В.С., Осадчий Я.Г. Математическая модель тепловых процессов в автомобильных баллонах с метаном // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 4. – С. 5-13.
2. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
3. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / Под общ. ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 791 с.
6. **Setzmann U., Wagner W.** A new equation of state and tables of thermodynamic properties for methane covering the range from melting line to 625 K at pressures up to 100 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1991. – V. 20. 6. – P. 1061-1155.
7. **Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. – М.: Наука, 1979. – 512 с.
8. **Зарубин В.С.** Математическое моделирование в технике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 496 с.
9. РД 3112194-1095-03. Руководство по организации и эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе. Министерство транспорта РФ. Департамент автомобильного транспорта. – М.: ФГУП НИИАТ. – 2002. – 59 с.
10. ГОСТ Р 51753–2001. Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 20 с.
11. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 684 с.
12. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В.К. Кошкина. – М.: Машиностроение, 1975. – 624 с.
13. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
14. Конструкционные материалы: Справочник / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

## Локомотивы, работающие на природном газе

22

**В.Ф. Руденко**, заслуженный конструктор РФ, к.т.н.

В статье изложены концепции создания магистральных и маневровых локомотивов, использующих природный газ в качестве моторного топлива. Рассмотрены вопросы применения газотурбинных и газопоршневых двигателей на локомотивах и обоснован выбор СПГ для мощных транспортных машин.

Некоторые статьи в СМИ [1-4 и др.] затрагивают проблему разработки газотурбовозов – одного из направлений создания автономного локомотива, работающего на природном газе (ПГ). Несмотря на низкий научно-технический уровень эти публикации не только вводят в заблуждение техническую общественность, но и влияют на принятие управленческих решений. Предлагаемая статья посвящена не столько ответу на упомянутые публикации, сколько рассмотрению концепции создания локомотивов, использующих природный газ в качестве моторного топлива.

### Ключевые слова:

природный газ, КПГ, СПГ, локомотив, газотурбовоз, маневровый газопоршневой локомотив, газовая турбина, газопоршневой двигатель.

**П**еревод значительной части транспортных средств на ПГ – одно из перспективных направлений энергетической стратегии России. ОАО «РЖД» потребляет более 9 % дизельного топлива от общего потребления в стране, и «Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» предусматривает его замещение к 2030 году природным газом (ПГ) на 25...30 %.

Создаваемые для этого автономные локомотивы должны соответствовать перспективным требованиям по экологическим показателям, выполнять ту же поездную работу, что и локомотивы сопоставимой мощности, иметь тот же коэффициент технической готовности, использовать в основном существующую инфраструктуру. При этом стоимость жизненного цикла локомотива должна быть сопоставима со стоимостью жизненного цикла аналога. Они могут быть предназначены для следующих целей:

- вождения поездов с весовой нормой мощных грузовых электровозов (мощность 8,5...9 МВт) на полигонах с автономной тягой;
- замены двух- и трехсекционных магистральных дизельных тепловозов (мощность 2...3 МВт в секции);
- маневровой работы (мощность  $\approx$  1 МВт).

### СПГ или КПГ?

Для интегрирования в существующий перевозочный процесс локомотива на его борту необходимо иметь примерно то же количество газа, что и дизельного топлива на равном по мощности тепловозе. Поэтому на маневровом локомотиве надо иметь примерно 5 т газа, а на магистральном – 2...2,5 т на МВт. Давление в емкостях с КПГ до 20...30 МПа, а с СПГ – не более 1 МПа. Масса существующих стальных баллонов для хранения на борту КПГ примерно в десять раз

больше массы хранимого газа, а масса криогенной емкости для СПГ примерно равна массе газа. При равных массах топлива криогенные емкости с СПГ и арматура занимают на локомотиве в 2-3 раза больший объем, чем баки с дизельным топливом, а системы с КПП – в 8-12 раз.

При применении в качестве силовой установки газотурбинного двигателя (ГТД) требуется подавать газ под давлением 2 МПа и более, а при использовании перспективных газовых поршневых двигателей (ГПД) с технологией HPCI (непосредственный впрыск топлива под высоким давлением) – под давлением более 30 МПа. Если в первом случае можно пойти на 10...15 % остатка КПП, то во втором обязательно создание дожимающего газового компрессора высокого давления. Для СПГ эта задача решается криогенными насосами с полной выработкой топлива. Криопотенциал СПГ можно использовать для охлаждения теплоносителей двигателя.

Цена КПП и СПГ, общая стоимость бортовых систем хранения и газоподготовки при равной массе газа довольно близки.

Из совокупности особенностей СПГ и КПП следует, что применение СПГ на локомотивах более рационально, чем КПП.

## Тепловой двигатель, использующий природный газ

Тепловые двигатели, работающие на природном газе, как поршневые, так и газотурбинные применяются в судостроении и стационарной энергетике. Естественно, они имеют своих предшественников в этих и других отраслях. Вообще говоря, во всех направлениях развития науки и техники всегда создавался базовый продукт для наиболее востребованного применения, после чего адаптировался для

широкого использования. На железнодорожном транспорте многие эксплуатируемые дизельные двигатели имеют своих предшественников, изначально созданных для судостроения, стационарной энергетики, авиации, автомобилестроения и т.д. Впоследствии они были адаптированы для нужд железных дорог с сохранением базовых узлов и идеологии машины в целом.

По назначению для применения на газовых локомотивах наиболее близки газовые электрогенераторы стационарной энергетики и судов, а также газовые двигатели газоперекачивающих установок. Газовые электрогенераторы, как правило, предназначены для работы на постоянной частоте вращения, и для повышения топливной эффективности электростанции снабжены котлоутилизатором, а ГТД часто работают совместно с паровой турбиной и оборудуются теплообменником-регенератором. Утилизатор и паровую турбину на локомотиве использовать сложно и дорого. Регенератор эффективен при постоянной, близкой к номиналу, нагрузке, и его применение тоже проблематично, особенно с учетом его больших габаритов и низкой вибростойкости. Наиболее приемлемый путь – «снижение режима», то есть снижение расхода топлива и воздуха на частичных режимах и холостом ходе.

При этом необходимо принимать во внимание опасность чрезмерного повышения коэффициента избытка воздуха (минимальный удельный расход природного газа ограничен «снизу»). Это свойство может быть компенсировано применением водорода в качестве добавки в природный газ, что позволяет в разы повысить топливную эффективность на частичных режимах и допустимый коэффициент избытка воздуха. Смесь природный газ + водород можно заранее приготовить (газ гайтан) или иметь на борту емкость с водородом,



однако более перспективно получение водорода непосредственно на борту локомотива электролизом дистиллированной воды или производством синтез-газа с помощью парциального окисления природного газа.

Работы в этих направлениях ведутся в России и за рубежом. Экспериментальные образцы для маломощных газовых двигателей существуют, и можно надеяться, что и у мощных тепловых двигателей на частичных режимах при использовании добавки водорода в природный газ КПД будет значительно повышен, однако коммерческого продукта пока нет.

### Топливная эффективность автономного локомотива на природном газе

Эффективность использования топлива локомотивом принято оценивать эксплуатационным КПД – отношением полезной работы, выполняемой ведущими колесами локомотива, к количеству теплоты, затраченной на ее получение за наблюдаемый период, например, за поездку, а целесообразнее за календарный год. Эксплуатационный КПД автономного локомотива зависит не только от КПД силовой установки, но и от времени его работы на частичных режимах и холостом ходе при движении поезда, а также от расхода топлива на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок и горячего отстоя.

Действующая нормативная база и сложившаяся в локомотивном хозяйстве практика предусматривают определение затраченного количества теплоты при фиксированной низшей теплоте сгорания примененного топлива, однако у дизельного топлива низшая теплота сгорания может изменяться в пределах 39,8...44 МДж/кг, а у ПГ эта величина может изменяться от 45 до 50 МДж/кг. Поэтому, несмотря на кажущуюся прозрачность,

эксплуатационный КПД как показатель весьма условен и практически неприменим для сравнения локомотивов, работающих на различных видах топлива. Наверное, следует проводить сравнение по топливной эффективности, учитывая стоимость единицы энергии при использовании конкретного топлива, как это делают в энергетике.

Эффективные КПД локомотивного дизеля и ГПД на номинальном режиме близки. Однако у дизеля отношение расхода топлива на частоте вращения холостого хода, в три раза ниже номинальной, к расходу на номинальном режиме составляет 1/50...1/30, при этом у ГПД это соотношение равно примерно 1/10...1/4. На номинальном режиме эффективный КПД у ГТД ниже, чем у дизеля, на 10...25 %. У ГТД стационарной энергетики на номинальной частоте вращения турбогенератора отношение расхода газа на холостом ходу к расходу на номинальном режиме находится в пределах 1/6...1/2,5. Вследствие этого основные работы по адаптации газовых двигателей для работы на локомотивах должны быть направлены в первую очередь на снижение расхода газа на холостом ходу и частичных режимах.

Следует обратить особое внимание и на то, что газовые двигатели выполняют самые жесткие перспективные экологические требования для дизелей. Возможно, будет создан дизельный двигатель для локомотивов с подобными экологическими параметрами. Основываясь на опыте автомобилестроителей (обеспечение требований Евро-5), можно полагать, что цены такого дизеля и газового мотора будут близки за счет систем очистки выхлопных газов, а топливная эффективность снизится на 5...10 %.

### Приемистость автономного локомотива

Под приемистостью автономного локомотива понимают скорость нарастания

мощности силовой установки. Существует норматив для локомотивных дизель-генераторов – 120 кВт/с. Выполнить его можно, однако, к сожалению, при определении величины этого норматива не было учтено его влияние на усиление боксования локомотива, продольную динамику поезда и обеспечение эргономических требований. При учете этого влияния следовало бы ограничить максимальную скорость нарастания силы тяги локомотива, что, естественно, ограничит скорость нарастания мощности. Поэтому до уточнения требований к приемистости локомотивной силовой установки можно ориентироваться на реализуемую серийными локомотивами приемистость – выход на полную мощность за 30...40 с при максимально допустимом ее нарастании не более 140...160 кВт/с на секцию. Это обусловлено особенностями применяемого на современных локомотивных дизелях свободного турбонаддува и вполне устраивает эксплуатационников.

Такие требования выполнимы и ГПД со свободным турбонаддувом. Известно, что у ГТД типовое время выхода на полную мощность составляет 5...15 с (на керосине), однако такая приемистость снижает их ресурс и на грузовом локомотиве невыгодна. Конечно, у стационарных установок частота вращения постоянна, а на локомотиве на частичных режимах ее желательно снизить. Поэтому, если не удастся решить проблему объединенным регулированием частоты вращения и мощности, нужно искать компромисс между приемистостью, экономичностью и ресурсом.

## Газотурбинные силовые установки на природном газе

Низкая цена природного газа по сравнению с нефтяными топливами вызвала рост применения в стационарной энер-

гетике газовых ГТД мощностью от 0,06 до 20 МВт. Несмотря на относительно высокую стоимость самой установки газотурбинные ТЭЦ при мощностях до 2 МВт успешно конкурируют с ТЭЦ с газопоршневыми двигателями вследствие меньших эксплуатационных расходов. При диапазоне мощности от 1 до 8 МВт ТЭЦ часто состоит из нескольких микротурбин малой мощности, что позволяет улучшить топливную эффективность станции при сезонных и суточных колебаниях нагрузки. В некоторых обстоятельствах решающую роль играет существенно меньшее количество вредных выбросов и относительно низкий шум. Мощные ГТД применяют на ТЭЦ городов и газоперекачивающих станциях. Благодаря использованию тепла отработавших газов на ТЭЦ (парогазовый цикл, когенерация, тригенерация, регенерация) эффективность использования топлива достигает 90 % и более.

От своих авиационных предшественников судовые и стационарные ГТД унаследовали идеологию термодинамического цикла, газодинамического тракта, а также конструктивные решения и технологию производства, их отличает высокая удельная мощность, они относительно мало расходуют масло. Однако в той или иной мере к ним перешли и недостатки – низкая топливная эффективность и высокая стоимость (в сравнении с дизелями). При адаптации ГТД для наземного применения в первую очередь стали применять относительно дешевые сорта топлив, изменив камеру сгорания. Для удешевления стационарных ГТД и повышения ресурса значительно снижена температура в камере сгорания. Удельная мощность и эффективный КПД на номинальной мощности несколько снизились, но это позволило обеспечить ресурс микротурбин 30...40 тыс. ч, а мощных ГТД –

100 тыс. ч и более, при этом допускается 300...500 холодных пусков в год без снижения ресурса. Удельная стоимость, к сожалению, относительно велика.

Важнейшей задачей при применении ГТД в транспортном режиме является снижение расхода топлива на частичных нагрузках и холостом ходе главным образом за счет снижения на этих режимах частоты вращения турбогенератора. На холостом ходу турбогенератора это весьма эффективно, и при снижении частоты в 2-3 раза на практике получено соотношение расходов 1/10...1/8. Однако при этом возникли следующие проблемы, которые потребовали решения:

- ГТД как объект управления в широком диапазоне режимов работы существенно изменяет свои параметры, что значительно усложняет алгоритмы регулирования, однако на современных средствах вычислительной техники они корректно реализуются;

- по ряду причин многие турбогенераторы с ГТД при номинальном режиме работают на частотах вращения выше критических (резонансные) и проходить их необходимо с относительно большой скоростью, однако известны конструкции валопроводов и подшипниковых узлов судовых установок, позволяющие работать на критических частотах вращения неограниченное время;

- при снижении частоты вращения расход воздуха относительно мал, что снижает КПД нерегулируемого лопаточного аппарата;

- есть проблемы из-за низкой скорости горения метана.

Следовательно, ГТД для локомотива отличается от стационарного и/или судового главным образом алгоритмами системы управления. Приемлемая простая конструкция валопровода, подшипников, лопаточного аппарата и камеры сгорания, отсутствие утилизатора и регенератора, а их

совершенствование для локомотивных ГТД возможно при достаточном технико-экономическом обосновании. Высокая готовность ГТД к запуску из холодного состояния в любых климатических условиях практически исключает затраты топлива на зимнее содержание локомотива в отстое, что значительно скажется на топливной экономичности при эксплуатации в северных условиях.

## Поршневые газовые двигатели

Серийные мощные ГПД созданы на базе дизелей, при этом их удельная мощность в 1,1-1,7 раза ниже, чем у базового дизеля, существенно отличаются фазы газораспределения и тепловой баланс, что обусловлено циклом Отто. Особенности тепломассообмена и неблагоприятный тепловой баланс требуют применения специального дорогостоящего масла, поскольку работа на частичных режимах (ниже 25...50 %) и холстом ходе вызывает его повышенный расход из-за создания разрежения на всасывании при низких частотах вращения турбокомпрессора. Производители ГПД не рекомендуют работу на этих режимах более 20...60 мин из-за роста расхода масла «на угар», его выброса в коллектор и опасности калильного зажигания горючей смеси. Поэтому после таких режимов рекомендуется работа ГПД с 70%-ной нагрузкой в течение 10...20 мин (у мощных дизелей эта проблема не столь выражена и «прожигать» их можно без нагрузки при повышенной частоте вращения). Приведенный к низшей теплоте сгорания расход топлива ГПД на всех режимах ниже, чем у равного по мощности дизеля. Тем не менее ГПД успешно применяются в автономной энергетике при мощностях ТЭЦ до 6...8 МВт.

Приближение технического уровня ГПД к показателям равных по

мощности дизелей некоторые фирмы надеются решить с помощью технологии HPDI. Она применяется на некоторых мощных бензиновых двигателях. Технология HPDI реализует цикл Тринклера – Сабатэ, что позволяет сохранить основные параметры базового дизеля – топливную эффективность, мощность, крутящий момент, газо- и воздухообмен, тепловой баланс и расход масла. В отличие от цикла Дизеля (подвод теплоты при постоянном давлении) теплота в нем подводится вначале при постоянном объеме и затем при постоянном давлении. Цикл предложен и внедрен Тринклером на первых в мире серийных дизелях, выпускавшихся заводом Нобеля (ныне «Русский дизель») после покупки лицензии у Дизеля, и используется на всех дизельных двигателях.

В настоящее время ведутся работы по повышению надежности и ресурса газовой форсунки высокого давления и совершенствованию рабочего процесса ГПД. Опытные образцы этих двигателей ожидаются в 2015 г., а серийное производство – после 2017-2020 гг.

## Инфраструктура

Затраты на инфраструктуру и подготовку персонала депо могут быть минимизированы за счет использования экипажей, кабин, тягового и вспомогательного оборудования серийно выпускаемых локомотивов. В идеальном случае эксплуатация газового локомотива должна отличаться от эксплуатации тепловоза только обслуживанием газового двигателя и системы газоподготовки, а также экипировкой СПГ.

Экипировка локомотива СПГ возможна несколькими способами.

1. Собственное производство СПГ в пунктах экипировки, поскольку специфические требования к пожаровзрывобезопасности и строительство магистрального газопровода для РЖД неприемлемы.

2. Собственные хранилища СПГ. Жесткие строительные нормы по пожаровзрывобезопасности и необходимость двух переливов СПГ делают значительно дороже заправочный комплекс.

3. Экипировка на крупном предприятии по сжижению ПГ.

4. Экипировка на предприятиях малотоннажного производства СПГ при ГРС. Производительность этих предприятий составляет примерно 2...3 т/ч, что недостаточно для нужд депо – маневровый локомотив будет тратить примерно 1 т/сут, а магистральный мощностью 8,5...9 МВт – 1 т/ч. Однако здесь себестоимость СПГ минимальна.

5. Съемная специализированная цистерна СПГ в габаритах танк-контейнера, заправляемая по вариантам 3 и 4 с последующей транспортировкой на контейнерные площадки. Бункеровку можно будет проводить с применением грузоподъемного оборудования контейнерной площадки. Кроме того, такой локомотив можно экипировать по вариантам 3 и 4, а также с метановозов на специально оборудованных площадках с требованиями не столь жесткими, как в варианте 2.

## Автономный грузовой локомотив мощностью 8,5...9 МВт на СПГ

Из ограничений по силам тяги на автосцепке [5] и нагрузкам на ось 23–25–27 тс следует, что для грузового локомотива коэффициент сцепления колесо – рельс у 12 тяговых осей должен быть на уровне 0,47–0,435–0,4 при разгоне и 0,35–0,325–0,3 при трогании. При 16 осях коэффициент сцепления составит 0,35–0,325–0,3 и 0,25–0,23–0,21 соответственно, а при 18 осях – 0,31–0,29–0,27 и 0,23–0,21–0,19.

Следовательно, для реализации предельных сил тяги при реальных коэффициентах сцепления и рациональном расходе песка достаточно иметь 16 тяговых осей, а тяговый

электропривод должен быть способен реализовывать тягу 5,9...8,125 тс на ось. При 12 осях потребуется привод, реализующий тягу 7,9...10,8 тс на ось. Кроме того, при 16 осях можно применить существующие колесно-моторные блоки серийных тепловозов, а при 12 – перспективных локомотивов с асинхронным тяговым приводом.

Пусть нагрузка на ось автономного локомотива равна 25 тс. Для снижения затрат на инфраструктуру и подготовку производства будем ориентироваться на применение отечественных серийных экипажей (тележки с тяговыми двигателями и главная рама с автосцепками) и вспомогательного оборудования. При этом тяговая секция 12-осного локомотива будет весить 150 т, а ее тяговые тележки и главная рама – 95...100 т. Остальное типичное для локомотивов оборудование, включая кабину, кузов, тормозные и другие системы, будет весить 22...25 т. Тогда допустимая масса силовой установки 12-осного локомотива составит 25...37 т. Тяговая секция 16-осного локомотива будет весить 200 т, из них 105...110 т придутся на главные рамы и тяговые тележки. Так как остальные компоненты 16-осного локомотива будут весить столько же, сколько у 12-осного, допустимая масса силовой установки составит 63...73 т.

Криогенная топливная емкость должна иметь минимальную поверхность и согласно условиям размещения минимальную длину, то есть быть цилиндрической. При вписывании в габарит 1–Т длина емкости с 20 т СПГ будет равна длине стандартного 40-футового контейнера. Для исключения попадания газа в кузов локомотива все криогенное и газовое оборудование желательно разместить на открытом воздухе или в специально вентилируемых отсеках, герметично отделенных от кузовного пространства. Это позволит использовать

на локомотиве электрооборудование не во взрывобезопасном исполнении.

Применение газотурбиной силовой установки мощностью 8,5...9 МВт и длиной около 8 м позволяет выполнить локомотив с передачей переменного тока в 16-осном исполнении на базе экипажа серийного тепловоза ТЭМ7А. Резерв по массе и габариту обеспечивает возможность установления энергоемкого накопителя, от которого энергию можно направить на вспомогательные нужды при низких напряжениях тягового генератора на малых скоростях, исключив вспомогательный генератор, и более эффективно эксплуатировать локомотив 12-осного экипажа с асинхронным приводом требуемой мощности в отечественной практике пока нет.

С учетом опыта, полученного при работах на газотурбовозе ГТ1h-001, и изложенной концепции специалистами ОАО «ВНИКТИ» разработана конструкторская документация серийного газотурбовоза, по которой на Людиновском тепловозостроительном заводе изготовлен газотурбовоз ГТ1h-002.

### **Автономный грузовой локомотив мощностью 4...6 МВт на СПГ**

Этот локомотив предназначен водить те же поезда, что и дизельные тепловозы эксплуатируемого парка. Поэтому он должен быть реализован в 12-осном экипаже и иметь около 13...14 т СПГ. Длина емкости будет равна примерно 8 м. Если применить на этом локомотиве ГПД, то понадобится так же, как и для рассмотренного выше локомотива, криогенный тендер для запаса топлива (подобный опытный газотепловоз был изготовлен в Луганске в 1987 г.), то есть потребуются еще четыре бегунковые оси, что позволит иметь около 20 т СПГ. Технически возможно создание

газотурбовоза с 12 осями и одной силовой установкой мощностью около 6 МВт, однако существующие ценовые соотношения дизелей, ГТД и ГПД не позволяют получить приемлемые экономические показатели.

## Маневровый тепловоз с газовым двигателем

Основными маневровыми локомотивами российского производства являются 6-осные тепловозы ТЭМ2 и ТЭМ18, и их тяговые свойства нужно придать газовому маневровому локомотиву. В габарите капота маневрового тепловоза емкость с 4...5 т СПГ будет весить около 10 т и иметь длину 20 футов.

Система газоподготовки и арматура емкости должны быть максимально приближены к переднему ее концу и располагаться с возможностью естественной вентиляции. Организация безопасного размещения системы предохранительного газосброса из емкости требует максимального расстояния от выхлопа двигателя и кабины машиниста и диктует следующую компоновку: криогенная емкость – система охлаждения газопоршневого двигателя – силовая установка – кабина машиниста.

ГПД благодаря хорошим экологическим свойствам перспективны для использования на маневровых локомотивах несмотря на относительно большой расход топлива на частичных режимах и холостом ходе. Из отечественных ГПД в наибольшей мере отвечает требованиям

работы на локомотиве двигатель ГДГ-800. Масса емкости не лимитирует выбор экипажа, однако ее длина вызывает необходимость коренного пересмотра компоновки всего оборудования локомотива и увеличения длины главной рамы примерно на метр. При этом можно использовать тележки от тепловоза ТЭМ18.

Снижение нагрузки на переднюю тележку по мере расходования СПГ повысит ее склонность к боксованию. Для устранения этого эффекта на таком локомотиве можно применить параллельное соединение тяговых двигателей вместо традиционного для маневровых локомотивов параллельно-последовательного и быстроедействующую систему обнаружения боксования.

С учетом изложенной концепции специалистами ОАО «ВНИКТИ» по согласованию с заказчиком разработана конструкторская документация тепловоза ТЭМ19, по которой на Брянском машиностроительном заводе изготовлен локомотив.

Близкие технико-экономические показатели могут быть получены и при использовании многотопливного (природный газ, дизельное топливо, керосин) ГТД-1250. При этом малая длина двигателя и отсутствие системы охлаждения позволяют сохранить длину главной рамы при минимальной переконпоновке оборудования, что чрезвычайно важно при модернизации существующего парка локомотивов ТЭМ2.

## Литература

1. Александров И.К. Модульный состав – экономия энергии // Мир транспорта. – 2013. – № 5.
2. Александров И.К. Поезда модульного типа на основе электровозов // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4.
3. Ильин Ю. Локомотивы на взлет! // Транспорт. – 2009. – № 1, 2.
4. Ильин Ю. Локомотивы для рекордов? // Транспорт. – 2012. – № 4. – С. 83-86.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 270 с.

# Эффективность применения диметилэфира на автомобильном транспорте

**В.И. Ерохов**, профессор Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), д.т.н.

Проанализированы физико-химические и моторные свойства диметилэфира. Приведены конструктивные и функциональные особенности топливной аппаратуры нового поколения для подачи диметилэфира. Приведена оценка технической, социально-экономической и экологической эффективности применения этого вида топлива на автомобильном транспорте.

#### Ключевые слова:

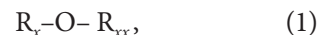
диметилэфир, газодизельная аппаратура, одноступенчатый газовый редуктор-испаритель, электромагнитная газовая форсунка, газовая магистраль, система управления, эффективность применения диметилэфира.

**С**овременный газодизель (ГД) имеет ряд бесспорных и доказанных преимуществ по сравнению с базовым двигателем. Работа ГД на режимах малых и средних нагрузок сопровождается повышенным выбросом СО и СН и заметным снижением топливной экономичности. Причин несколько. Одна из них связана со сравнительно быстрым сгоранием запальной дозы (ЗД) до начала активного тепловыделения из-за относительной малой ее величины [1].

Машиностроительный университет МАМИ разработал концепцию газодизельного двигателя с аппаратурой нового поколения для подачи диметилэфира (ДМЭ). В ее основе – ряд известных положений. Система топливоподачи создана по аналогии с системой Blue power dizel [2].

Целью данной работы является создание газодизельной аппаратуры нового поколения на основе электронной системы управления подачей газа во впускной трубопровод двигателя.

ДМЭ представляет собой простейший эфир – органическое вещество, молекулы которого состоят из углеводородных радикалов, соединенных атомами кислорода:



где радикалы  $R_x$  и  $R_{xx}$  могут быть различные или одинаковые.

В обычном состоянии ДМЭ представляет собой разновидность сжиженных газов. При давлении выше 0,6 МПа и температуре 20 °С ДМЭ легко сжижается и находится в жидком состоянии. В атмосфере за сутки ДМЭ полностью химически распадается и не достигает стратосферы. Диметилэфир по своим физико-химическим параметрам (за исключением ЦЧ) очень сходен с СУГ (табл. 1).

Улучшение химических характеристик ДМЭ обусловлено отсутствием валентных углеродных связей в его структурной формуле, понижающих склонность к образованию сажи при сгорании. Молекула ДМЭ содержит 35 % кислорода,

Таблица 1

## Физико-химические и моторные свойства ДМЭ

Показатель	ДМЭ C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	ДТ C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	27,6	46,5	45,8	42,5
ЦЧ	55...60	5	5	47,3
Содержание, %				
кислорода	34,8	–	–	–
углерода	52,2	82	–	87,2
водорода	12,8	18	–	12,8
Молекулярная масса, кг/кмоль	46,07	44,1	58,12	240
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>				
жидкой фазы	660	585	600	830
газовой фазы	1,59	2,019	2,703	
Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup>	1470	–	–	1470
Удельный вес в газообразном состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1,59	2,01	2,7	
Вязкость жидкой фазы, мм <sup>2</sup> /с	0,25	0,15	0,18	3,53
Сера, ppm	5	0	0	500
Ароматические углеводороды, %	0	0	0	25
Давление насыщенных паров при 20 °С, кг/см <sup>2</sup>	6,0	8,4	2,1	0,004
Средняя температура кипения, °С	24,9	–42,1	–0,5	180...370
Температура самовоспламенения, °С	220	470	400	240
Теплота испарения, кДж/кг	410	344	358	850
Стехиометрическое число, кг/кг	9,07	15,8	15,6	14,56
Скорость звука при 20 °С, м/с	865	800	900	1330

что обуславливает более низкую теплоту сгорания. Наличие кислорода внутри молекулы способствует его присутствию в зоне горения.

Жесткость сгорания при работе на ДМЭ будет повышенной из-за высокой летучести (легкие фракции). У диметилэфира плотность жидкой фазы на 33 % больше, чем у СУГ, и на 20 % меньше, чем у ДТ, а теплота сгорания на 26 % ниже, чем у СУГ, и на 35 %, чем у ДТ. Для стехиометрической смеси ДМЭ требуется 9,1 кг воздуха, а для ДТ – 14,3 кг/кг.

Важное преимущество ДМЭ обусловлено высоким ЦЧ (55...60) по сравнению с ДТ (45...50). Уменьшение износа подвижных частей топливной системы при использовании ДМЭ обеспечивается применением необходимой присадки. Смазывающая способность ДМЭ

повышается добавкой в топливо специальной присадки-лубликатора, в качестве которой используется Lubrizol 539 А в количестве 50...100 ppm от ДМЭ.

Хорошая испаряемость ДМЭ способствует быстрой газификации впрыскиваемых в цилиндр топливных струй, улучшению процесса смесеобразования и повышению топливной экономичности. Давление ДМЭ существенно выше по сравнению с ДТ.

Вязкость ДМЭ в 20-40 раз менее, чем у ДТ, при высокой испаряемости. Недостаток существующей дизельной топливной аппаратуры связан с утечкой ДМЭ, обладающего высокой диффузией и вытекающего из форсунки дизеля даже при отсутствии давления в линии высокого давления (ЛВД). Температура вспышки ДМЭ ниже в сравнении с ДТ,



что определяет повышенную пожаро- и взрывоопасность. Коэффициент оптической плотности отработавших газов (ОГ) снижается при работе на ДМЭ. Поэтому наиболее эффективный ГД нового поколения может быть применен в системах Commonrail (англ. *общая магистраль*), а также на автомобилях с электронной педалью газа и дизелях с элементами электроники.

ДМЭ может быть получен из любого углеводородного сырья. Существует несколько способов производства диметилэфира из органических соединений. Сырьевой базой для производства ДМЭ являются природный газ (ПГ), уголь, кокс нефтяного происхождения и биомасса. Технология изготовления ДМЭ заключается в конверсии ПГ, угля или биомассы методом реформинг-процесса в синтез-газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), который затем путем прямого процесса превращается в ДМЭ.

Применяют отработанный (через получение метанола), а также более эффективный новый (через синтез-газ) технологические способы массового производства ДМЭ на базе ПГ. Один из способов получения ДМЭ – разложение метанола путем его обезвоживания в среде кислородного катализатора по формуле



Крупнотоннажное производство основывается на синтез-газе (смесь водорода и монооксида углерода). Отечественные химические заводы способны производить ДМЭ в достаточном объеме для удовлетворения энергетических потребностей автотранспорта и смежных отраслей национальной экономики. В парфюмерии ДМЭ заменяет вредные газы (фреон, бутан и пропан). Наиболее экономичный способ – получение из ПГ.

ДМЭ не оказывает канцерогенного воздействия на живые организмы, однако в больших концентрациях он может представлять опасность при его вдыхании. ДМЭ применяют в качестве

компонента для аэрозолей и растворителей в электронной промышленности.

Годовой объем производства ДМЭ в мире составляет 150 тыс. т/г. В качестве исходных продуктов традиционно рассматривались метанол и продукты синтеза Фишера – Тропша.

Физико-химические свойства ДМЭ обеспечивают его использование в качестве моторного топлива и энергоносителя. В массовом масштабе ДМЭ не вырабатывается. В РФ ДМЭ производит Новомосковская акционерная компания «Азот», входящая в состав минерально-химической компании ЗАО МХК «Еврохим». В газодизельной системе на двигателе с воспламенением от сжатия применен принцип работы на одновременном использовании двух видов топлив – дизельного и газового [2]. Благодаря возможностям электронного блока управления можно устанавливать эту систему на дизельных двигателях различных типов.

Основной объем ДМЭ изготавливается из метанола-сырца на установках синтеза под давлением 32...40 МПа, при котором метанол образуется как примесь (5 %). Объем производства ДМЭ в России не превышает 10 тыс. т/г. При сгорании ДТ образуются вредные соединения, а ДМЭ распадается на углекислый газ и воду. ДМЭ дешевле дизельного топлива в 1,7 раза.

Содержание выбросов вредных веществ в ОГ зависит от объема концентрации ДМЭ в заряде дизеля. При испытаниях концентрация ДМЭ в воздухе изменялась от 0,95 до 1,32 %. Поскольку ДМЭ хорошо воспламеняется в КС дизеля, его работа на эфирметаноловой смеси отличается мягким процессом сгорания.

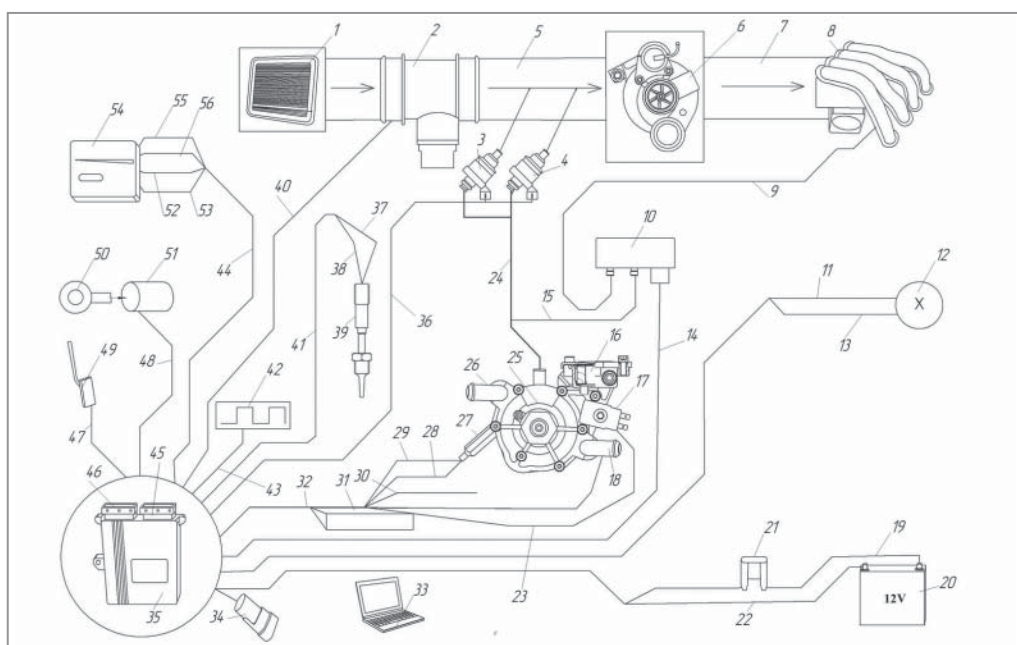
На режимах с полной нагрузкой дымность ОГ снижается на 2 ед. по шкале Bosch, а на частичных нагрузках – на 0,5...1,0 ед. по сравнению с работой на ДТ. Дополнительное снижение содержания  $\text{NO}_x$  в ОГ достигнуто путем регулирования количества ДМЭ во впускаемом

воздухе. Мощность дизеля при переходе на ДМЭ увеличивается на 10 %, а шум рабочего процесса снижается на 10 %.

Применение ДМЭ сопровождается снижением концентраций ПАУ и увеличением расхода топлива на 12 % по сравнению с ДТ. Подобная закономерность обусловлена меньшей теплотворной способностью эфира (37,02 против 43,47 МДж/кг у ДТ). При работе на ДМЭ повышается содержание альдегидов. Концентрация СО в ОГ увеличивается в среднем на 30...40 %. Рост концентраций

СН и СО при работе дизеля на смеси обусловлен несгоревшими парами горючей смеси в застойных зонах цилиндра.

Стоимость ДМЭ выше традиционного нефтяного топлива. Его получают из отходов производства масел. Эфиры отличаются от масел минимальными параметрами плотности и вязкости, более высоким ЦЧ и меньшей температурой воспламенения. Система питания современного газодизеля и ДТ с электронным управлением приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Система питания современного газодизеля с электронным управлением:

1 – воздушный фильтр; 2 – расходомер воздуха; 3, 4 – ЭМФ; 5 – трубопровод подачи воздуха; 6 – турбоагнетатель; 7 – трубопровод подачи газовой смеси; 8 – впускные патрубки; 9 – вакуумный шланг; 10 – датчик давления; 11 – электрический провод (зеленый, сигнал С); 12, 54 – переключатели вида топлива; 13 – электрический провод (желтый, сигнал В); 14, 19, 22, 23, 28, 29, 32, 36-38, 40, 41, 43, 48 – электрические провода; 15 – резиновый шланг; 16 – газовый фильтр; 17 – электромагнитный клапан; 18 – штуцер подачи охлаждающей жидкости; 20 – аккумуляторная батарея; 21 – предохранитель; 24 – газопровод; 25 – одноступенчатый редуктор; 26 – штуцер отвода охлаждающей жидкости; 27, 39 – датчики температуры; 30 – электрический провод (белый, уровень газа в баллоне); 31 – клапан; 33 – компьютер; 34 – интерфейс; 35 – блок управления установкой ГБУ; 42 – светодиод частоты вращения; 44 – кабель переключателя; 45, 46 – разъемы блока; 47 – провод электрической цепи педали управления; 49 – педаль управления; 50 – ключ зажигания; 51 – замок зажигания; 52 – электрический провод (1/2 наполнения баллона); 53 – электрический провод (1/4 наполнения баллона); 55 – электрический провод 5 В (баллон полный); 56 – электрический провод (3/4 наполнения баллона)

В системе топливоподачи для корректировки сигнала давления ДТ используют CDI-эмулятор системы Commonrail и эмулятор MAP (эмулятор датчика давления в ВТ). ДМЭ подается из баллона в одноступенчатый редуктор 25 и испаряется в нем теплом охлаждающей жидкости, которая поступает через патрубки. Затем газ поступает к форсункам через фильтр паровой фазы. Форсунки подают газ по трубопроводам через штуцеры, устанавливаемые в ВТ двигателя. Если двигатель имеет турбонаддув, то газ подают перед турбиной.

Педаль управления 49 содержит модуль, устанавливаемый в виде единого узла, включающего педаль акселератора и датчик. Электронный блок 35 (ЭБУ ДМЭ) управляет газовыми форсунками в соответствии с информацией о нагрузке, скорости вращения КВ, температуры ОГ и других параметрах. ЭБУ ДМЭ соединен с датчиками, обеспечивающими необходимые данные для управления совместной подачей дизельного топлива и газа.

Педаль содержит электронную схему, размещенную на металлической пластине, и катушку возбуждения. На электронную схему модуля педали акселератора подается питание под напряжением 5 В для создания переменного тока высокой частоты, питающего катушки возбуждения, которые создают переменное магнитное поле, действующее на подвижную металлическую пластину. В результате этого вокруг пластины образуется собственное магнитное поле, зависящее от ее положения и воздействующее на приемные катушки, генерируя в них переменные токи для выработки выходного сигнала датчика. Напряжение индуцируемого каждой приемной катушкой тока зависит от положения относительно нее металлической пластины.

В электронной схеме индуцируемые тремя катушками переменные токи выпрямляются и усиливаются, а их напряжение соотносится друг с другом. После обработки получается сигнал,

напряжение которого линейно изменяется по ходу педали.

Получая необходимые сигналы, сочетание которых может иметь несколько вариантов в зависимости от устройства двигателя, ЭБУ ДМЭ обрабатывает их и определяет необходимую дозу диметилэфира в общей доле.

Система управления современного газодизеля при работе на альтернативных видах топлива (АВТ) и ДТ приведена на рис. 2.

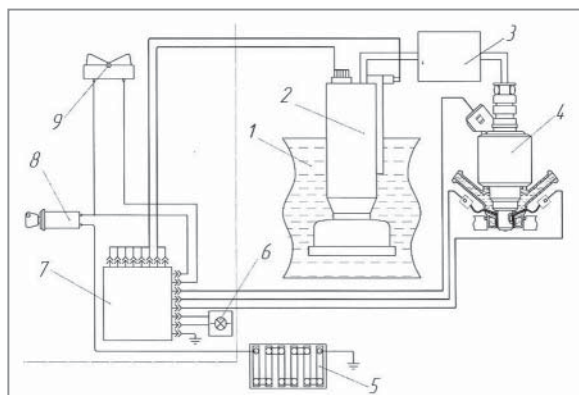


**Рис. 2.** Система управления современного газодизеля при работе на АВТ и ДТ

Для контроля уровня газа, вида топлива и ручного переключения с дизельного на газодизельный режим используется автоматический переключатель (газ–дизель, когда пустой баллон). Одним из важных элементов системы является газовый редуктор, обеспечивающий подачу ДМЭ в систему топливоподачи. В зависимости от вида используемого топлива (СУГ или природный газ) система содержит различные типы редукторов.

Функциональная схема системы подачи ДМЭ и ДТ двигателя приведена на рис. 3.

Система содержит резервуар для хранения сжиженного газового топлива, оборудованный электрическим топливным насосом, подающий и сливной трубопроводы, топливный аккумулятор с регулятором давления и электроуправляемые форсунки.



**Рис. 3.** Функциональная схема системы питания альтернативным топливом:  
 1 – резервуар; 2 – электрический газовый насос; 3 – редуктор; 4 – ЭМФ;  
 5 – аккумуляторная батарея; 6 – индикаторная лампа; 7 – ЭБУ; 8 – замок зажигания; 9 – переключатель

Система питания двигателя ДМЭ включает в себя резервуар 1 для хранения ДМЭ, электрический топливный насос 2, а также мультиклапан, запорное устройство, подающий и сливной трубопроводы, топливный аккумулятор с регулятором давления и электроуправляемые форсунки 4. Электрический топливный насос 2 подает ДМЭ в сжиженной фазе из резервуара 1 по подающему трубопроводу через редуктор 3 к электроуправляемой форсунке 4. Давление ДМЭ в редукторе поддерживается на постоянном уровне по отношению к давлению воздуха во впускном трубопроводе двигателя посредством регулятора давления.

При включенном зажигании аккумуляторная батарея 5 подключается к форсунке 4 и электронному блоку управления 7, который обеспечивает подачу напряжения от аккумуляторной батареи 5 в цепь питания топливного насоса 2. В результате топливный насос 2 обеспечивает подачу сжиженного ДМЭ под давлением к форсунке 4. ЭБУ 7 на основании ряда датчиков (массового расхода воздуха, положения дроссельной заслонки, остаточного кислорода в отработавших газах, скорости вращения коленчатого

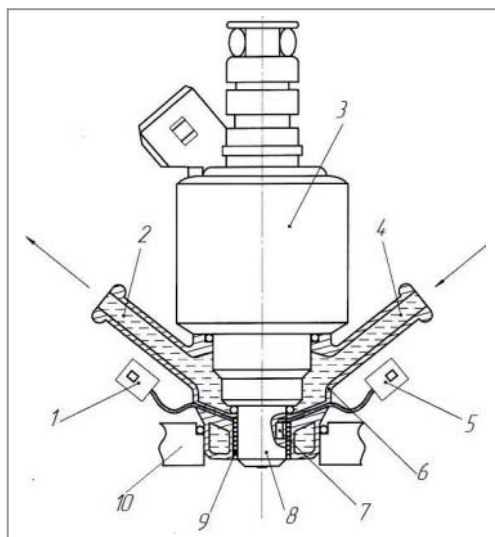
вала и положения распределительного вала) подает управляющие сигналы на электроуправляемую форсунку 4, обеспечивая фазированную подачу необходимого количества сжиженного ДМЭ во впускной трубопровод двигателя в зависимости от режима его работы.

Перед форсункой расположен редуктор 3, поддерживающий постоянное давление посредством регулятора, обеспечивающего слив излишков топлива по сливному трубопроводу через обратный клапан в резервуар для его хранения. Для исключения утечек газового топлива сливной трубопровод на входе в резервуар оборудован обратным клапаном, а подающий трубопровод – электромагнитным клапаном, закрывающимся при отключении электропитания. Подобная система питания обеспечивает подачу во впускной трубопровод ДВС топлива в сжиженной фазе, что положительно сказывается на мощностной характеристике двигателя.

При включении замка зажигания 8 микроконтроллер ЭБУ 7 по положению переключателя 9 и состоянию реле, а также по информации, поступающей от датчиков температуры окружающей среды, температуры в топливном резервуаре, давления во впускном трубопроводе и давления в редукторе, запускает соответствующую программу управления электродвигателем привода топливного насоса и шаговым электродвигателем клапана управления байпасным каналом. Если давление в топливном резервуаре выше 0,4 МПа, ЭБУ отключает электродвигатель топливного насоса, топливо под давлением, имеющимся в топливном резервуаре 1, начинает поступать через байпасный канал, при этом управление потоком топлива осуществляется изменением проходного сечения байпасного канала с помощью клапана, перемещаемого шаговым электродвигателем на необходимое число шагов, задаваемое ЭБУ.

При переводе переключателя 9 перемены вида топлива ЭБУ устанавливает соответствующий режим электрического

подогрева корпуса распылителя форсунки и включает индикаторную лампу б. Форсунка, оборудованная системой подогрева распылителя, приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Принципиальная схема электромагнитной форсунки:  
1, 5 – клеммы; 2 – выходной штуцер;  
3 – корпус ЭМФ; 4 – входной штуцер;  
6 – полый элемент; 7 – датчик температуры распылителя; 8 – распылитель; 9 – устройство подогрева; 10 – впускной трубопровод

Форсунка представляет собой электромагнитный клапан, снабженный на выходе калиброванным жиклером. Во время работы на ДМЭ ЭБУ получает информацию о давлении, температуре газа, поступающего на форсунки, и разрежении в ВТ.

При работе на ДМЭ форсунка впрыскивает топливо в ВТ около впускных клапанов. Открытием и закрытием форсунок управляет ЭБУ газовой системы, соединенный со штатным электронным блоком управления двигателя. При отсутствии управляющего сигнала напряжение на обмотку клапана не подается.

Истечение ДМЭ через сопло распылителя 8 форсунки 3 сопровождается интенсивным его испарением, что приводит к резкому понижению температуры на срезе сопла распылителя 8 и его

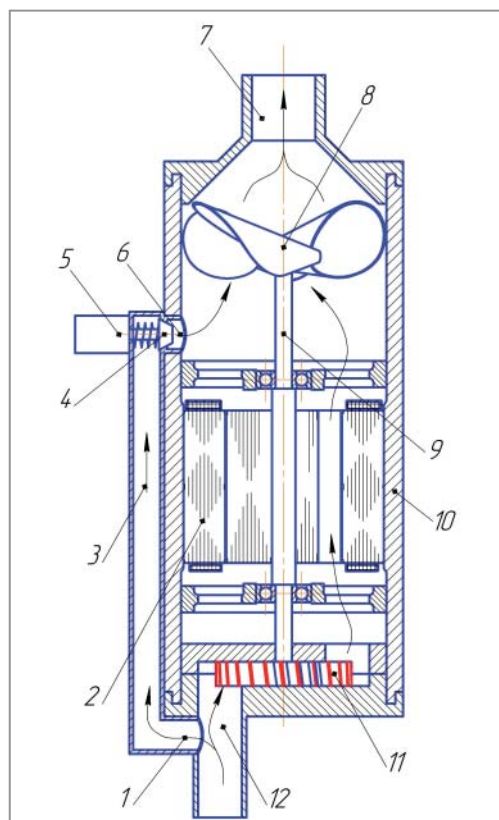
обледенению, а также к примерзанию запорной иглы форсунки 3. Для подогрева с целью предотвращения этого ее распылитель 8 помещен в съемный полый элемент 6, имеющий штуцеры 2, 4 для подвода и отвода жидкости из системы охлаждения двигателя, который размещен на распылителе 8. Устройство 9 электрического подогрева распылителя 8 форсунки 3 размещено в цилиндрическом зазоре между внешней частью корпуса распылителя и внутренней цилиндрической частью съемного полого элемента 6. Для подключения к соответствующему выходу ЭБУ электроподогревающее устройство 9 снабжено клеммой 5. При пуске и прогреве двигателя включается электрический подогрев, а на рабочих режимах проводится подогрев от охлаждающей жидкости. Датчик 7 температуры распылителя 8 размещен в его корпусе и снабжен клеммой 5 для подключения к соответствующему входу ЭБУ. По сигналам датчиков температур окружающей среды, топливного резервуара, корпуса распылителя 8 форсунки, а также датчика режима работы ДВС ЭБУ выдает электрический сигнал для регулирования электрического подогрева корпуса распылителя 8.

Электромагнитные форсунки снабжены системой температурного контроля их состояния и устройством установки мощности подогрева распылителей при переключении системы питания с летнего топлива на зимний и наоборот. Датчик температуры установлен в корпусе распылителя форсунки. Датчики соединены электрической связью с соответствующими входами ЭБУ. Переключатель установки мощности подогрева форсунок и контрольная лампа для индикации установлены в салоне транспортного средства и соединены электрической связью с ЭБУ.

Традиционная система не обеспечивает интенсивное испарение ДМЭ на срезе сопла распылителя форсунки, что может привести к обледенению сопла и вызвать некорректное дозирование

топлива. Подогрев электроуправляемых форсунок обеспечивается за счет подвода к ним жидкости от системы охлаждения двигателя. При этом в непосредственной близости к распылителю форсунки располагаются каналы подвода охлаждающей жидкости. Кроме этого, система дополнена электрическим подогревающим устройством, обеспечивающим индивидуальный подогрев распылителей каждой форсунки. Нагревательный элемент электрического подогревателя расположен вокруг цилиндрической части корпуса распылителя форсунки.

Принципиальная схема топливного насоса приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Принципиальная схема топливного насоса:

1 – направление потока топлива; 2 – бесколлекторный двигатель; 3 – байпасный канал; 4 – запорный элемент; 5 – клапан управления; 6 – седло клапана; 7 – выходной канал; 8 – лопасти; 9 – вал; 10 – корпус; 11 – рабочее колесо; 12 – входной канал

Топливный насос включает электрический бесколлекторный двигатель 2, дополнительное рабочее колесо, укрепленное на общем валу электродвигателя 2 с основным рабочим колесом, байпасный канал 3, который снабжен клапаном 5 с шаговым ЭД, управляемый от ЭБУ с микроконтроллером по сигналам датчиков температуры окружающей среды и давления в топливном резервуаре. Рабочее колесо состоит из четырех конусообразных лопастей 8, четырехгранной пластины, к граням которой прикреплены лопасти. Каждая лопасть имеет отверстие. Обходной (байпасный) канал 3 обеспечивает отключение насоса при температуре окружающей среды выше нуля градусов и высоком давлении в топливном резервуаре.

Привод топливного насоса представляет собой электрический бесколлекторный двигатель 2 (например, вентильный реактивный электродвигатель) с микропроцессорным управлением, позволяющим изменять частоту вращения рабочих колес насоса в широком диапазоне и соответственно его производительность по сигналам датчиков в зависимости от рабочих условий, а также повышать его надежность ввиду отсутствия коллектора, щеток, щеткодержателей.

Лопастями 8 дополнительного рабочего колеса под действием потока топлива приводят во вращение вал электродвигателя. Поступающее в насос топливо перемешивается лопастями 8, образуя с помощью отверстий микровихри, способствующие повышению эффективности процесса.

Система впрыска ДМЭ снабжена переключателем и реле для перемены программы управления топливным насосом в зависимости от сезона эксплуатации транспортного средства с двигателем, работающим на сжиженном газе.

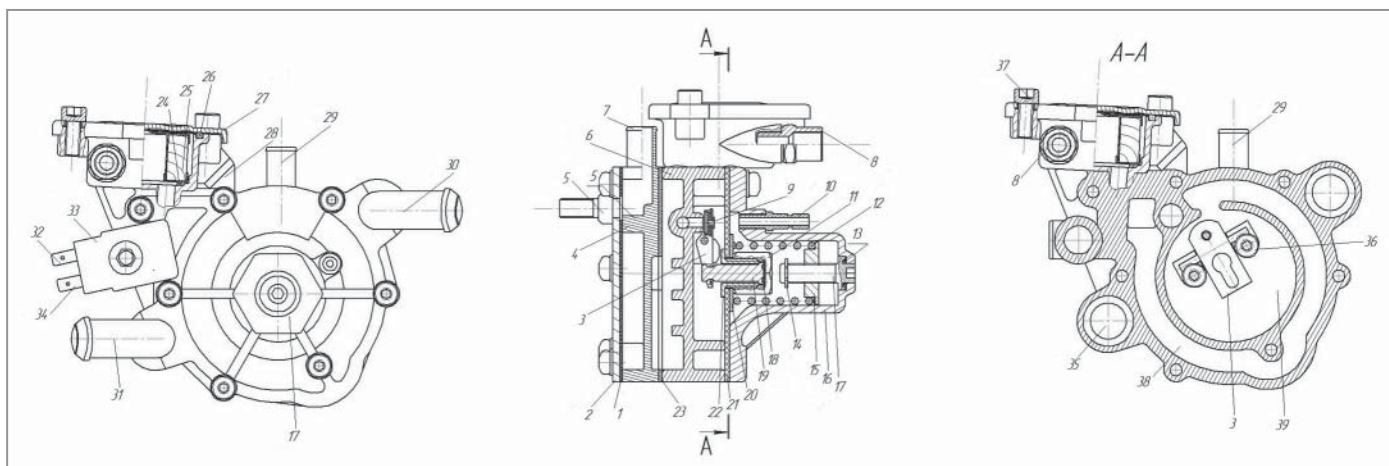
Топливный насос снабжен дополнительным рабочим колесом, укрепленным на общем валу 9 электродвигателя с основным рабочим колесом,

осуществляющим перемешивание компонентов топлива перед топливоподачей на всех режимах работы ДВС. При достаточно высоких давлениях в топливном резервуаре и при больших расходах топлива поток, проходящий через дополнительное рабочее колесо, создает ему вращающий момент, который через вал передается на электродвигатель, работающий в этом случае как датчик потока. Это позволяет через микроконтроллер ЭБУ более гибко управлять процессом топливоподачи, особенно на критических режимах, путем передачи на электродвигатель насоса подтормаживающего момента. Через дополнительное колесо происходит регулирование скорости потока.

Топливный насос установлен в нижней части топливного резервуара. Бесколлекторный электродвигатель и шаговый ЭД клапана 5 управления байпасным каналом соединены электрической связью с выводами ЭБУ с микроконтроллером. Реле переключения блока управления также соединено электрической связью с выводами ЭБУ.

Принципиальная схема редуктора-испарителя ДМЭ системы питания газодизеля приведена на рис. 6.

Редуктор для подачи ДМЭ представляет собой устройство для снижения давления газа до 0,3 МПа, поступающего из баллона с давлением 1,6 МПа. Это одноступенчатый автоматический регулятор подачи газа. Редуктор состоит из корпуса, клапана, мембраны, пружины, штуцеров подвода и отвода теплоносителя, штуцеров входа и выхода ДМЭ через предохранительный клапан. Газ через штуцер подвода ДМЭ и клапан поступает в полость низкого давления, где повышение давления приводит к перемещению мембраны с тарелкой, в результате чего держатель клапана воздействует на клапан, что приводит к закрытию полости. В этой полости устанавливается давление, соответствующее усилию пружины, и отсекается от полости высокого давления. Изменяя усилие затяжки тарировочной пружины вращением регулировочного винта, можно корректировать давление в полости низкого давления.



**Рис. 6.** Редуктор-испаритель ДМЭ системы питания газодизеля:

- 1 – прокладка крышки; 2 – крышка корпуса; 3 – рычаг клапана; 4 – корпус испарителя;
- 5 – шпилька крепления; 6, 16 – корпус редуктора; 7 – штуцер выхода газа; 8 – штуцер входа газа;
- 9 – клапан; 10 – штуцер; 11 – гайка; 12 – пружина; 13, 15 – прокладки; 14 – стопорное кольцо;
- 17 – стакан корпуса редуктора; 18, 33 – регулировочные винты; 19 – тяга клапана;
- 20 – тарелка мембраны; 21, 23 – мембрана; 22 – заглушка; 24, 26 – уплотнитель; 25, 28 – фильтры;
- 27 – скоба; 29 – штуцер подачи газа; 30 – штуцер отвода газа; 32, 34 – контакты; 35 – канал;
- 36 – система крепления; 37 – винт крепления; 38 – выходная полость; 39 – полость давления

Редуктор имеет каналы, по которым газ в случае протечки (через основные уплотнения) при разрыве мембраны или срабатывании предохранительного клапана выводится по гибкому дренажному шлангу за пределы автомобиля. Дренажный шланг через тройник соединен с датчиком протечки газа.

Давление газового топлива в редукторе поддерживается на постоянном уровне по отношению к давлению воздуха во впускном трубопроводе двигателя посредством регулятора давления, обеспечивающего слив излишков топлива по сливному трубопроводу через обратный клапан в резервуар для его хранения. При этом электроуправляемые форсунки обеспечены системой подогрева распылителя.

Исследования проведены на отечественных и зарубежных дизелях путем применения различных доз ДМЭ и угла опережения впрыскивания в зависимости от нагрузки. В работе применено смешанное регулирование подачи смеси состава ДТ+ДМЭ. Температура ОГ на большинстве эксплуатационных режимов лежала в пределах 300...420 °С. Максимальная температура ОГ составляла 550...580 °С. В работе удалось провести разделение процесса сгорания в газодизеле на фазы горения дизеля и ДМЭ.

Высокие выбросы  $\text{NO}_x$  на больших нагрузках определяются ростом давления и температуры цикла, а также снижением коэффициента избытка воздуха. Высокие выбросы СО и СН на малых нагрузках связаны с ростом коэффициента избытка воздуха. В наблюдаемых точках перегиба величина ДМЭ становится сравнимой с суммарной величиной топлива, и процесс стремится к дизельному. При газодизельном процессе существенно снижаются выбросы твердых частиц, что дает возможность применения нейтрализатора. Закономерным преимуществом газодизельного процесса в целом являются лучшие показатели токсичности и дымности ОГ.

Высокая энергия ДМЭ обеспечивает надежное воспламенение бедной газозоудушной смеси, а также подготавливает быстрое сгорание основной порции топлива. Снижение величины ДМЭ ниже минимального уровня неизбежно приводит к пропускам или даже невозможности воспламенения газозоудушной смеси.

Переход двигателя на газодизельный режим сопровождается повышением мощности крутящего момента во всем диапазоне внешней скоростной характеристики. При этом наблюдается небольшое повышение температуры отработавших газов ( $t_{\text{ог}}$ ).

Удельный расход топлива при работе на газодизельном режиме снижается практически во всем диапазоне. Однако на режимах малой частоты вращения КВ двигателя расход топлива на газодизельном режиме несколько выше. На газодизельном режиме наблюдается резкое снижение дымности ОГ во всем диапазоне скоростной характеристики в 2-3 раза и не превышает 20 %.

Применение смешанного регулирования топливоподачи позволяет улучшить топливную экономичность газодизеля на режимах малых и средних нагрузок до 25-30 % при одновременном снижении выброса ВВ.

Максимальная величина замещения базового топлива составляет 60 % общего расхода топлива при работе двигателя по внешней скоростной характеристике газодизельного двигателя. Температура газа, поступающего в двигатель, существенно влияет на его мощностные показатели. Распределение температур по цилиндрам газодизеля значительно лучше по сравнению с дизелем.

Подбор оптимального закона подачи ДМЭ и ДТ, а также применение системы рециркуляции позволяют снизить расход топлива до 40 г/кВт·ч, а также сократить массовый выброс ВВ от неполного сгорания топлива в 5-7 раз и тем самым обеспечить выполнение перспективных



норм по выбросу вредных веществ ниже уровня требований Правила EECRN49.03 (CO – 1 г/кВт, СН – 0,5 г/кВт и NO<sub>x</sub> – 2 г/кВт) без применения специальных антиоксидантных систем.

Результаты сравнительных испытаний дизеля при работе на ДМЭ и дизельном топливе приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Сравнительная оценка ОГ дизеля при работе на ДМЭ и ДТ

Топливо	Выбросы, г/(кВт·ч)			Максимальный шум, дБ(А)
	NO <sub>x</sub>	СН	Твердые частицы	
ДМЭ	1,6	0,3	0,025	78
ДТ	3,8	0,3	0,08	88

Из таблицы видно, что основные преимущества ДМЭ – это бездымное сгорание, уменьшенные шум и выбросы NO<sub>x</sub>. Приведенные данные получены при испытании по 13-режимному европейскому циклу одноцилиндрового дизеля (V<sub>н</sub>=2 л) с турбонаддувом и охлаждением воздуха. Мощности двигателя одинаковы для двух типов топлива. Дизельный двигатель, работающий на ДМЭ без рециркуляции и нейтрализатора, отвечает жесткому калифорнийскому стандарту ULEV. Использование ДМЭ целесообразно для дизелей (табл. 3), эксплуатирующихся в крупных городах с большими транспортными потоками.

Таблица 3

### Сравнительные экологические характеристики дизельного двигателя

Топливо	Содержание элементов, % (по массе)			Теплота сгорания, МДж/кг	Плотность, г/см <sup>3</sup>	L <sub>теор</sub> , кг/кг	ЦЧ
	С	Н	О				
ДМЭ	52,2	13	34,8	27,8	0,66	9,0	55...60
ДТ	87,0	12,6	0,04	42,5	0,82	14,6	40...52

При работе на ДМЭ время на смесеобразование и задержка воспламенения сокращаются, а холодный запуск существенно облегчается. Необходимое давление впрыскивания ДМЭ составляет всего

30 МПа. Объем топливного баллона для ДМЭ должен быть примерно такой же, как объем бензобака (при равном пробеге автомобиля). При t=20 °С давление насыщенных паров ДМЭ составляет 0,5 МПа, поэтому баллон должен выдерживать давление, равное 0,9 МПа. Общие затраты на изготовление, транспортировку и хранение, то есть на всю инфраструктуру для ДМЭ на 6 % больше, чем для ДТ, но значительно меньше, чем для бензина.

При работе двигателя на ДМЭ наблюдается более мягкий процесс впрыскивания: менее интенсивный, двухступенчатый или двухстадийный. Привлекательность замены ДТ диметилэфиром заключается также в отказе от высоких давлений впрыскивания, применяемых в современных топливных системах дизелей.

По своим свойствам ДМЭ существенно отличается от стандартных ДТ. Для обеспечения мощности, равной базовой, массовую цикловую подачу увеличивают на 35 %, а объемную на 50...60 %.

Пониженная вязкость ДМЭ требует доводки топливной аппаратуры для обеспечения ее долговечности. Для образования коэффициента избытка воздуха α=1 горючей смеси для ДМЭ требуется 9,07 кг воздуха, а для ДТ – 14,56 кг/кг. Повышение качества смесеобразования и сгорания позволило изменить состав смеси с α=1,5 до α=1,34 (дизельный двигатель ЯМЗ) без превышения установленного предела дымления.

Применение ДМЭ в дизельных двигателях обеспечивает их соответствие стандарту Евро-4. Выбросы NO<sub>x</sub> при работе на ДМЭ в 2,5 раза ниже по сравнению с обычным ДТ.

Использование ДМЭ в дизельных двигателях актуально благодаря его низкой склонности к дымлению, высокому ЦЧ и короткой задержке воспламенения. В США стоимость ДМЭ в 1,5 раза выше ДТ. В Европе стоимость ДМЭ на 6 % выше ДТ. Содержание в нем

35 % связанного кислорода практически полностью устраняет дымность ОГ.

При работе дизелей на ДМЭ выбросы  $\text{NO}_x$  снижаются в 3-4 раза при практически бездымном выхлопе на основных режимах работы. Улучшение эксплуатационных характеристик обусловлено снижением динамики цикла и давления сгорания, уменьшающих шумность на 10 дБ(А).

Конвертирование дизелей для работы на ДМЭ состоит в небольшой модернизации топливной аппаратуры, направленной на увеличение объемной подачи топлива и уплотнение ЛНД для приспособления ее к работе на повышенном давлении порядка 1,0...2,0 МПа.

По прогнозу управления транспорта и связи правительства Москвы и ГНЦ РФ «НАМИ», годовая потребность в ДМЭ как топлива составит около 160 тыс. т. В перспективе целесообразно перевести на диметилэфир весь транспорт городского хозяйства. Двухтопливный грузовик может работать на ДТ и ДМЭ в соотношении 40 и 60 % соответственно. Коэффициент расхода ДМЭ уменьшается на 25 % по сравнению с проливкой на ДТ. Для обеспечения параметров базового двигателя площадь распылителей необходимо увеличить на 25 %.

Влияние ДМЭ на показатели работы дизельного двигателя на различных топливах при разной нагрузке приведено на рис. 7.

Термический КПД дизеля на ДМЭ (кривая 11) равен его значению при использовании ДТ (кривая 10). Лишь на режимах с высокой нагрузкой эффективность сгорания ДМЭ несколько выше, чем у ДТ. Содержание  $\text{NO}_x$  в ОГ при этом снижалось в 2-2,5 раза (кривая 5), что связано со значительным охлаждением горючей смеси из-за высокой температуры испарения ДМЭ (кривая 6) и снижением максимальной температуры сгорания. Высокая испаряемость ДМЭ сопровождается улучшением смесеобразования, способствующего уменьше-

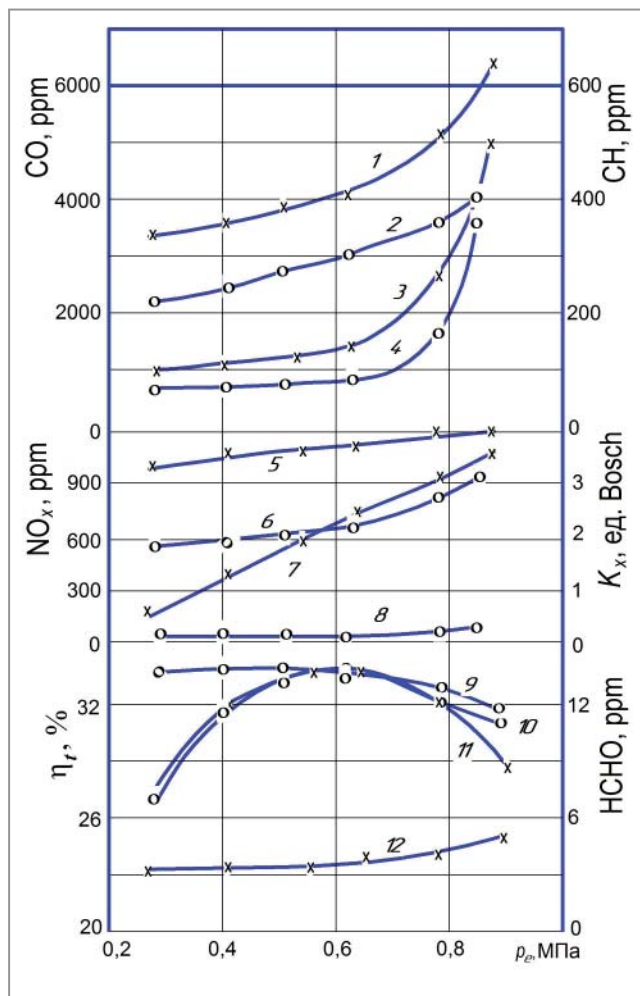
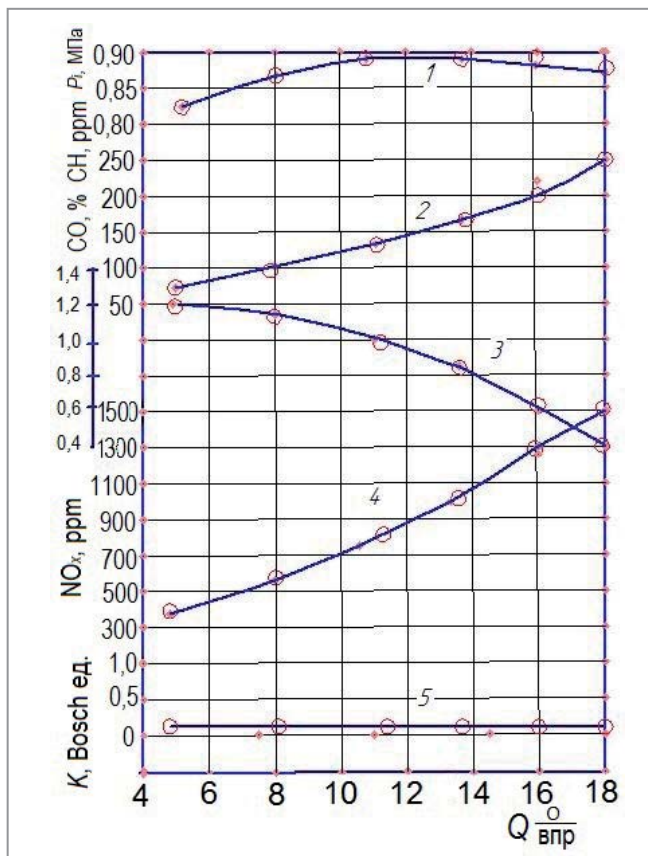


Рис. 7. Влияние ДМЭ на показатели работы дизельного двигателя при  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ :

x — x — ДТ; 1 — CO; 3 — CH; 5 —  $\text{NO}_x$ ; 7 — дымность  $K_x$ ; 9 — формальдегиды; 10 — КПД; o — o — ДМЭ; 2 — CO; 4 — CH; 6 —  $\text{NO}_x$ ; 8 —  $K_x$ ; 11 — КПД; 12 — формальдегиды

нию в ОГ легких углеводородов (кривая 3) и особенно дымности ОГ (кривая 8). При работе на режимах с высокими нагрузками отмечено снижение CO (кривая 2). По содержанию в ОГ формальдегида HCHO работа дизеля на ДМЭ (кривая 9) уступает его работе на ДТ (кривая 12). Однако содержание простейшего углерода в ОГ в обоих случаях незначительно.

Влияние угла опережения впрыска на выброс ВВ при работе дизеля на ДМЭ приведено на рис. 8.



**Рис. 8.** Влияние УОВ при работе дизеля на ДМЭ и ДТ при  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$

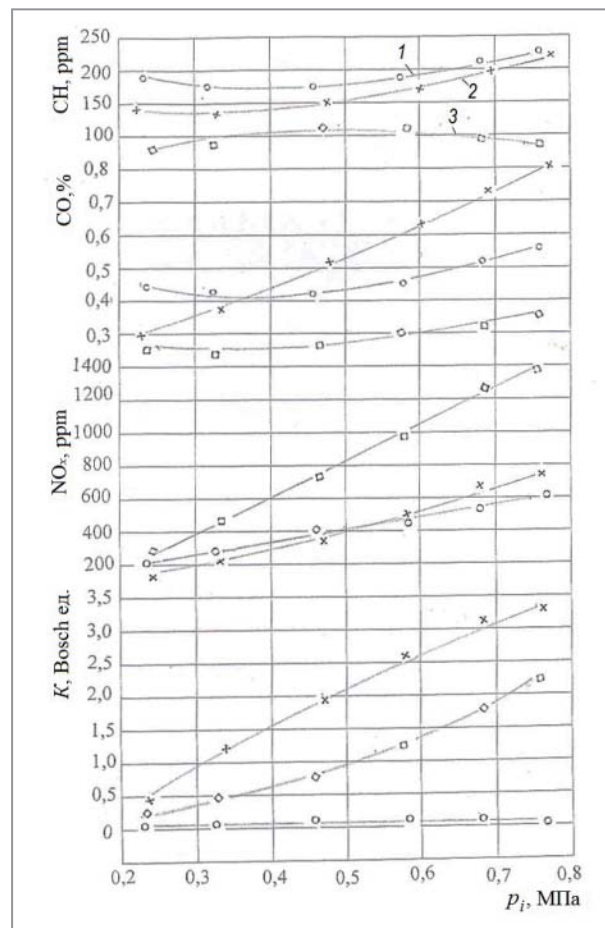
При поздних углах опережения впрыска (УОВ) выбросы CO при работе на ДМЭ существенно возрастают, достигая  $1200 \text{ млн}^{-1}$ .

Хорошее смесеобразование уменьшает количество переобогащенных топливом зон, и снижается их зависимость от УОВ. Возрастание CO на средних и больших нагрузках при переходе на ДМЭ обусловлено использованием поздних углов опережения впрыска.

При больших нагрузках наблюдается заметное снижение CH при работе на поздних углах УОВ. Так, при УОВ=4,9° выбросы CH составляют 74 ppm. Отсутствие сажи обеспечивает работу дизеля на ДМЭ на малых углах УОВ, позволяющих снизить выбросы NO<sub>x</sub> и CH, а также обеспечить повышенную температуру ОГ для работы окислительного нейтрализатора. Снижение

выбросов CH при поздних углах УОВ связано с повышением температуры в конце такта расширения. При низких температурах дожигание CH оказывает заметное влияние на их выброс.

Влияние нагрузки дизеля на выброс ВВ с ОГ при работе на ДМЭ и ДТ приведено на рис. 9.



**Рис. 9.** Вредные выбросы ОГ при работе дизельного двигателя на ДМЭ и ДТ при  $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ :

1 – ДМЭ; 2 – ДТ (оптимизация УОВ по минимуму NO<sub>x</sub>); 3 – ДТ (оптимизация УОВ по максимальному давлению p<sub>i</sub>)

Важной характеристикой работы дизеля является снижение оксидов азота. На дизельном топливе сняты две характеристики: ДТ-1 (кривая 2) при работе с оптимальным углом впрыска, обеспечивающим максимальное значение

$p_p$  и ДТ-2 с поздним углом впрыска, обеспечивающим минимальным выброс  $\text{NO}_x$  (кривая 3). При оптимальном угле впрыска (кривая 2) переход на ДМЭ позволяет снизить содержание  $\text{NO}_x$  на 30...60 %. Большие значения относятся к области высоких нагрузок.

Переход с ДТ-1 на ДМЭ приводит к увеличению выброса  $\text{CO}$  (см. рис. 9, кривая 1). При этом наблюдается резкое снижение сажи в ОГ (кривая 3). При изменении УОВ (ДТ-2) выбросы  $\text{CO}$  превысили показатели, полученные на ДМЭ. Однако при поздних углах выбросы  $\text{CO}$  при работе на ДМЭ существенно возрастают до 1200 ppm (см. рис. 9). В целом при переходе с ДТ на ДМЭ выброс  $\text{CO}$  увеличивается в 3,5 раза.

Отсутствие сажи при работе на ДМЭ позволяет использовать поздние углы впрыска топлива с целью снижения выбросов  $\text{NO}_x$  (см. рис. 9, кривая 2). На больших нагрузках выбросы  $\text{CO}$  при переходе с ДТ на ДМЭ увеличиваются, особенно на поздних УОВ.

Уменьшение УОВ привело к существенному увеличению дымления. Эффективность применения ДМЭ по дымности ОГ бесспорна, а по выбросу  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  имеет сложную зависимость.

Снижение скорости нарастания давления в цилиндре при использовании ДМЭ является следствием уменьшения задержки воспламенения, а также доли топлива, поданного за этот период. Система позволяет программно изменять подачу ДМЭ в широком диапазоне и управлять моментом начала и продолжительностью впрыскивания. В данной системе можно выделить два контура – низкого и высокого давления топлива.

Работа в газодизельном режиме сопровождается повышенным выбросом  $\text{CH}$  и  $\text{CO}$  по сравнению с аналогичными параметрами дизельного процесса. Это является следствием неправильно организованного процесса сгорания газового топлива. В ГД сгорание запальной дозы из-за малой ее ве-

личины происходит достаточно быстро до начала активного сгорания газового топлива. Сгорание ДТ происходит при высоких значениях коэффициента избытка воздуха независимо от нагрузочного режима работы двигателя.

Величина подачи ДМЭ оказывает заметное влияние на выброс вредных веществ. Изменение запальной дозы  $\Delta_{\text{ГДМЭ}}$  в пределах 10...40 оказывает заметное влияние на выброс  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}$ . По мере увеличения запальной дозы концентрация  $\text{NO}_x$  (при высоких  $p_e$ ) и особенно  $\text{CH}$  (при малых  $p_e$ ) в ОГ снижается.

Эффективность газодизельного режима можно определить с помощью разработанного коэффициента экологической эффективности, представляющего собой отношение приведенной суммарной токсичности дизеля к суммарной токсичности газодизеля:

$$K_{\text{ЭГД}} = \frac{\sum_i^n T_{\text{ДТ}}^{\text{CO}}}{\sum_i^n T_{\text{ГД}}^{\text{CO}}} \leq 1,0, \quad (4)$$

где  $T_{\text{ДТ}}^{\text{CO}}$  – суммарная приведенная токсичность дизеля;  $T_{\text{ГД}}^{\text{CO}}$  – суммарная приведенная токсичность газодизеля;  $n$  – сумма компонентов.

Коэффициент экологической эффективности изменяется в диапазоне 1...2. Его величина представляет количество воздуха ( $\text{m}^3$ ), необходимое для разбавления ОГ до безвредного состояния.

Испытания дизельного и газодизельного двигателей показали, что на режимах ускорения газодизельный процесс обеспечивает снижение дымности ОГ в 2,7 раза в сравнении с дизельным процессом, а на режиме максимальной частоты вращения КВ двигателя – в 3 раза (табл. 4). На установившихся режимах показатели дымности газодизельного процесса в 1,7 раза меньше по сравнению с дизельным. На режимах максимальных крутящего момента и мощности дымность ОГ при работе по газодизельному циклу значительно меньше, чем по дизельному циклу.

Показатели дымности и токсичности ОГ дизеля и газодизеля

Режим	Предельные нормы по ГОСТ 21393-85	Процесс	
		Дизельный	Газодизельный
Свободного ускорения	40	36	12
Максимальной частоты вращения КВ	15	14	4

В перспективе необходимо проведение работ по доводке системы управления и прежде всего – углов опережения впрыскивания жидкого топлива, а также подбору топливной подающей аппаратуры, обеспечивающей улучшение подачи и распыления малых доз жидкого топлива.

Газодизельные автомобили позволяют снизить расход топлива на 75...80 % за счет замещения дизельного топлива ДМЭ. Например, для автомобиля КАМАЗ-53218 экономия составляет 10...12 т жидкого топлива в год.

Дымность ОГ при использовании ДМЭ снижается в 2-2,5 раза и не превышает 25 %. На частичных нагрузках происходит некоторое ухудшение экономических показателей по мере снижения нагрузки, что связано с ухудшением протекания процесса сгорания.

Диметилэфир по своим физико-химическим показателям и данным моторных испытаний может стать в XXI в. основным видом моторного топлива в мире, над внедрением которого в настоящее время интенсивно работают многие ведущие отечественные организации и зарубежные фирмы. Создана новая прогрессивная технология преобразования природного газа (и других видов сырья), обеспечивающего только умеренный экологический эффект, в идеальное моторное топливо, отвечающее всем

самым жестким экологическим и экономическим нормам.

Разработанный алгоритм управления процессами топливоподачи и воспламенения ДМЭ позволяет реализовать потенциальные свойства ДМЭ. Создана система питания двигателя с цифровым дозирующим устройством для подачи ДМЭ. Разработан алгоритм и программа для управления созданной системой питания ДМЭ.

Также разработан метод организации рабочего процесса газодизеля нового поколения с микропроцессорной системой управления. Определен и реализован оптимальный закон подачи запальной дозы дизельного топлива.

Применение газодизельной системы увеличивает мощность двигателя до 20 %, обеспечивает замещение дизельного топлива на 75...80 %, улучшает топливную экономичность ГД на 10...15 % на режимах малых и средних нагрузок, снижает уровень дымности и токсичности ОГ, а также шум автомобиля. Система позволяет рационально решить многие вопросы радикального повышения энергетической и экологической эффективности автомобильного транспорта.

Разработанный газодизельный процесс представляет собой новую технологию совместного использования ДТ и ДМЭ.

## Литература

1. Карунин А.Л., Ерохов В.И. Газодизельные автомобили. Учебное пособие. – М.: МГТУ «МАМИ», 1999. – 345 с.
2. <http://gas-energy-blue-power.Ru/informatsiya/106-gazodizel-blue-power>.

# Системы аккумулирования водорода на борту автотранспортного средства

В.М. Фомин, профессор МГМУ (МАМИ), д.т.н.

Проводится сравнительный анализ характеристик и перспектив развития различных систем хранения водорода на борту транспортного средства. С учетом существующего состояния отечественной структуры автотранспортных технологий обосновывается целесообразность бортового хранения водорода в химически связанном виде в жидких средах.

#### Ключевые слова:

бортовое аккумулирование водорода, носители водорода, конверсия, термохимическая переработка.

**П**ри использовании водорода в качестве топлива для автотранспортных средств (АТС) одной из наиболее важных задач является разработка экономически оправданного, гибкого в использовании комплекса средств бортового аккумулирования водорода. Понятием «аккумулирование водорода» объединяются как методы и процессы хранения водорода в виде индивидуального вещества, так и процессы, в которых хранение водорода осуществляется в химически связанном виде. Во всех случаях процессы аккумулирования водорода сопровождаются затратами энергии и связаны с разработкой соответствующей технологической структуры по созданию среды аккумулирования и системы хранения в целом.

При анализе целесообразности применения различных способов и систем аккумулирования водорода в составе АТС следует принимать во внимание его необходимые объемы и способы последующего использования в качестве топлива. Во многих случаях необходимо

рассматривать и условия доставки водорода к потребителю, так как эффективность аккумулирования существенно зависит от затрат на транспортировку водорода.

Принципиально возможны следующие способы бортового аккумулирования водорода:

- в газообразном состоянии под давлением;
- в жидком состоянии в криогенных емкостях;
- в твердофазном связанном состоянии в гидридах металлов;
- в химически связанном состоянии в жидких средах;
- в адсорбированном состоянии на криоадсорбентах при низких температурах;
- в инкапсулированном газообразном состоянии в стеклянных микросферах.

К настоящему времени не сложилось единого подхода к выбору способа хранения водорода на борту АТС. К наиболее освоенным и применяемым

на практике методам аккумуляции водорода в сфере автотранспортного комплекса могут быть отнесены следующие [1]: газобаллонный (в баллонах высокого давления), криогенный (в жидком виде), металлгидридный и в химически связанном состоянии. Другие из перечисленных выше методов находятся в стадии перспективной разработки.

### Аккумуляция газообразного водорода в компримированном виде

Наиболее простым и не требующим разработки новой технологии является бортовой способ хранения водорода в баллонах при высоком давлении. Серийно выпускаемые металлические баллоны рассчитаны на давление от 10 до 40 МПа и аккумулируют от 0,7 до 1,3 % водорода от массы баллона. Основными материалами для изготовления таких баллонов являются сталь, титановые и алюминиевые сплавы, а также конструкционные композиционные материалы. Каждый из материалов имеет свои особенности, которые влияют на конструкцию баллона.

Так, использование высокопрочных сталей в конструкциях баков для хранения водорода ограничивается явлением водородной хрупкости и возникновением водородных трещин, что приводит к резкому снижению несущей способности баллона. Использование титановых сплавов ограничено сложностью технологической обработки, охрупчиванием материала при длительном контакте с водородом и высокой стоимостью высокопрочных титановых сплавов.

При использовании конструкционных композиционных материалов (стекло-, угле-, органоластики) возникают проблемы с герметичностью конструкции, которая обеспечивается использованием герметизирующего слоя (лейнера). При этом в зависимости от материала и толщины лейнера он может

обеспечивать герметичность и повышать несущую способность баллона. В качестве герметизирующего материала могут использоваться нержавеющая сталь, титановые и алюминиевые сплавы, полимерные пленочные материалы.

Также при изготовлении баллонов используют способы формирования их стенок из комбинаций материалов. В этом случае стенка баллона состоит из двух слоев: внутреннего металлического и наружного из композиционного материала. Как показывает анализ напряженно-деформированного состояния, использование комбинированных оболочек, состоящих из двух слоев материалов, позволяет получать наиболее эффективные конструкции. При изготовлении баллонов с металлическим лейнером и силовой оболочкой из композиционного материала толщина металла может не превышать 0,15...0,5 мм. Стыки листов соединяются с помощью электронно-лучевой или лазерной сварки.

Конструктивная форма баллонов может меняться в зависимости от формы и размеров свободного объема, предназначенного для их размещения на АТС. С точки зрения прочности предпочтительной является сфера, позволяющая получать равнопрочную силовую оболочку почти равномерной толщины.

Цилиндрический водородный баллон со сферическими или эллиптическими днищами при изготовлении из изотропного материала (металл) имеет достаточно большую массу, снизить которую можно постановкой второй оболочки из анизотропного материала. У такого баллона внутренний слой, контактирующий с водородом, выполнен из алюминиевых или титановых сплавов, а наружный – из органоластика, армированного угольным волокном.

С точки зрения стоимости предпочтительным является сочетание алюминия с конструкционным композитом. Использование современных технологий позволяет производить

баллоны с массовым содержанием в них водорода 5...10 % от массы сосуда. Полагают [1], что при таком содержании водорода баллоны могут эффективно эксплуатироваться в составе энергоустановки АТС. Кроме того, при установке на автомобиль такого баллона можно практически без доработок использовать для его заправки водородом существующие газонаполнительные станции. В настоящее время в США серийно производятся композитные баллоны различных типоразмеров с массовым содержанием водорода около 4 % при давлении до 31 МПа. В перспективе запланировано создание емкостей для коммерческого использования с массовым содержанием водорода до 5,5 % при давлении 41,4...69 МПа [2].

Во всех схемах и устройствах для хранения газообразного водорода предусматривается его предварительное сжатие. Работа, необходимая для сжатия водорода, отнесенная к низшей теплоте его сгорания (120 МДж/кг), почти в 4 раза превосходит аналогичный показатель для природного газа при одинаковых степенях сжатия. Для существующих компрессоров затраты энергии на сжатие водорода от 0,1 до 15...20 МПа достигают 8...10 % его низшей теплоты сгорания [3].

Основными проблемами при создании поршневых многоступенчатых компрессоров для водорода являются уменьшение потерь водорода и предотвращение растрескивания узлов из высокопрочных сталей. В таких компрессорах обычно ограничиваются степенями сжатия на ступень не выше 3, чтобы при адиабатическом сжатии водорода его температура не превышала 423 К, и ряд узлов выполняют из пластичных сталей с хромированной поверхностью. Затраты на создание компрессорных установок для водорода превосходят таковые для природного газа.

## Аккумуляция водорода в жидком состоянии

Жидкий водород имеет температуру кипения  $-252,4$  °С и плотность 0,071 кг/л, тогда как в сжатом виде под давлением 30 МПа его плотность составляет только 0,025 кг/л. Следовательно жидкий водород более компактный, чем сжатый, и в этом смысле представляет значительный интерес для транспорта. Техника ожижения водорода хорошо освоена промышленностью [4].

В настоящее время наиболее распространены промышленные установки для ожижения водорода производительностью 15...30 т водорода в сутки. Процесс его ожижения имеет некоторые особенности, определяемые его физико-химическими свойствами. Газообразный водород, получаемый в тех или иных процессах, может содержать различные примеси, которые при температуре нормальной точки кипения водорода существуют в твердой фазе. Присутствие этих примесей может нарушить работу различных систем ожижителя. Например, наличие частиц твердого кислорода в жидком водороде недопустимо по соображениям безопасности.

Хранение жидкого водорода практикуется как в относительно небольших, так и в крупных объемах (в несколько миллионов литров). В настоящее время созданы и применяются сосуды с эффективной многослойной изоляцией, которые могут использоваться на АЗС для стационарного долговременного хранения жидкого водорода с минимальными потерями на испарение (0,1...0,5 % в сутки), то есть автономное хранение имеет продолжительность около 200...1000 суток. В России в химической промышленности широко применяются сосуды различных типов для долговременного хранения жидкого водорода объемом от 14 000 до 120 000 л.

Перевозить жидкий водород можно водным (в танкерах), железнодорожным



(в специальных цистернах) и автомобильным (в специальных автоцистернах) транспортом. Транспортировку жидкого водорода на короткие расстояния (менее 80...100 км) выгоднее выполнять автомобильным, а на более далекие – железнодорожным или водным транспортом [4]. Следует отметить, что потери жидкого водорода на всем протяжении его транспортировки от завода-ожижителя до АЗС и конечного потребителя (АТС) довольно велики.

При использовании водорода в жидком виде в качестве топлива для АТС требуется принятие сложных специальных мер, в числе которых и несколько продувок для предотвращения попадания воздуха в системы топливоподачи и хранения. Создание относительно небольших баков для хранения жидкого водорода на борту АТС, а также систем их заправки является самостоятельной и весьма сложной задачей. При использовании криогенной системы относительно большого объема (200...250 л) на автомобилях требуется серьезное изменение кузова, что уменьшает его полезный объем. Большой проблемой остается утечка водорода из баллонов. Улучшенные характеристики имеют криогенные автомобильные баки для жидкого водорода с экранно-вакуумной изоляцией, которые были разработаны в США, Германии, Японии и в нашей стране.

### Аккумуляция водорода в твердофазном связанном состоянии в гидридах металлов

Идея использования гидридов металлов для аккумуляции водорода в твердофазном связанном состоянии была выдвинута во второй половине 60-х гг. прошлого столетия. Активные исследования и разработки в этой области в последующие годы привели к созданию многообразных поглощающих сплавов и систем аккумуляции водорода

с их использованием. Наиболее эффективными для аккумуляции водорода оказались интерметаллические соединения и сплавы, в число компонентов которых входят металлы, способные к образованию устойчивых бинарных гидридов. Важными для инженерных приложений являются такие параметры бинарных гидридов, как плотность, относительное изменение объема сплава при гидрировании и его эффективная теплопроводность [5].

Поскольку в процессах гидрирования – дегидрирования аккумулярующие сплавы довольно существенно изменяют объем (на 20...30 %), конструкция устройства должна предусматривать возможность расширения частиц сплава без деформации или разрушения контейнера. Кроме того, при многократном повторении циклов гидрирования происходит уменьшение первоначальных размеров частиц сплава, что, естественно, сказывается на таких важных характеристиках, как эффективная теплопроводность и проницаемость засыпки. Окончательные размеры частиц устанавливаются после нескольких десятков (иногда сотен) циклов и составляют несколько микрометров. Поскольку активированный сплав является мелкодисперсным порошком, в процессе работы аккумулятора водорода со свободной засыпкой сплава может происходить вынос порошка из контейнера. Для предотвращения этих нежелательных явлений применяются тонкие фильтры, пористые трубы и т.д.

Эффективная теплопроводность активированных порошков интерметаллида достаточно низка и зависит от размера частиц, температуры и давления водорода. При низких давлениях (до 100 Па) перенос теплоты водородом по мелкодисперсному пространству невелик, и теплопроводность засыпки составляет около 0,1...0,2 Вт/(м·К). С ростом давления водорода увеличивается конвективный перенос теплоты в засыпке,

и ее теплопроводность увеличивается до  $0,5 \dots 1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  при  $p \approx 0,1 \dots 5 \text{ МПа}$  [6].

Важнейшими режимными показателями работы системы аккумулярования являются скорости поглощения и выдачи водорода (временные интервалы циклов сорбции и десорбции). Фактором, лимитирующим скорость выделения и поглощения водорода аккумулятором, в большинстве случаев является тепломассообмен в слоях частиц интерметаллида. Таким образом, для обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик металлгидридных водородных аккумуляторов во многих случаях необходимо наряду с организацией эффективного тепломассообмена применять предварительное компримирование водорода при зарядке аккумуляторов, что, естественно, приводит к дополнительным затратам энергии.

В настоящее время в России и за рубежом созданы и прошли испытания несколько десятков экспериментальных металлгидридных аккумуляторов для легковых и грузовых автомобилей, тракторов, автопогрузчиков, тягачей, автобусов [6, 7]. Например, в нашей стране для грузовых автомобилей разработана серия экспериментальных металлгидридных аккумуляторов с массой активного металла около  $350 \dots 450 \text{ кг}$  (масса аккумуляруемого водорода  $5,65 \dots 7,79 \text{ кг}$ ) [7]. Использовались сплавы на основе Ti, Fe с добавками V, Mn и др. Аккумуляторы имеют внутренние водяные теплообменники, модульную конструкцию и содержат до 1,3 % водорода по отношению к массе аккумулятора. Проводятся работы по созданию для автотранспорта опытных образцов аккумуляторов водорода модульной конструкции [6]. Для их разработки использованы сплавы на основе FeTi. Особенностью этих аккумуляторов является применение сплавов в виде компактных пористых дисков, армированных алюминием, в результате чего увеличивается эффективная теплопроводность среды аккумулярования и появляется

возможность применения модульной конструкции с разветвленной системой каналов для теплоносителя (вода или отработавшие газы). Время зарядки этих аккумуляторов при давлении водорода 5 МПа составляет около 10 мин.

Созданные к настоящему времени экспериментальные и коммерческие образцы металлгидридных аккумуляторов водорода позволяют сделать выводы как об эффективности их применения на транспортных средствах различного назначения и преимуществах в ряде случаев по сравнению с другими методами аккумулярования, так и о некоторых присущих им недостатках.

Важнейшим достоинством металлгидридных аккумуляторов для АТС является возможность «бесплатного» использования низкопотенциальной отходящей теплоты двигателя для обеспечения работы аккумуляторов при максимальной безопасности хранения водорода в условиях АТС. При аварийной разгерметизации контейнера происходит выброс большой массы газа, а лишь медленное разложение гидридов с выделением водорода, причем эта реакция в силу ее эндотермичности является лимитированной – при охлаждении гидридов скорость их разложения уменьшается.

Главными трудностями, сдерживающими широкое внедрение металлгидридных аккумуляторов, в настоящее время являются следующие: относительно большая масса среды хранения и возможность их «отравления» при сравнительно небольших концентрациях в водороде соединений серы; необходимость компримирования водорода для обеспечения приемлемых скоростей зарядки аккумулятора; относительно низкая эффективная теплопроводность среды аккумулярования и сложность организации в ней эффективного тепломассообмена. Кроме того, стоимость сплавов для металлгидридных аккумуляторов в настоящее время довольно высокая. Это приводит к достаточно высокой

стоимости всей системы аккумулирования. Многие выполняемые в настоящее время исследования направлены на преодоление этих трудностей.

Существенного снижения удельных капиталовложений в металлгидридные аккумуляторы можно добиться, повышая содержание доступного водорода (сегодня оно в среднем составляет около 1,5 %). По оценкам специалистов, только при массовом содержании доступного водорода более 2,5 % внедрение металлгидридных систем в транспортную энергетику станет экономически оправданным.

### Аккумуляция водорода в химически связанном состоянии в жидких средах

Большая группа методов аккумуляции и транспортировки водорода, интенсивно изучаемых в последнее время, относится к водороду в химически связанном состоянии в виде жидких химических соединений (аммиак, метанол, этанол и др.) и в так называемых жидких гидридах – органических соединениях, которые допускают простые реакции гидрирования на катализаторах при умеренных температурах. При получении водорода конверсией или диссоциацией метанола и этанола, а также разложением аммиака среда хранения не сохраняется, то есть используется однократно. Жидкие же гидриды допускают многократное использование и в цикле гидрирование – хранение – транспорт – дегидрирование возвращаются в исходное состояние.

Массовый показатель среды аккумуляции водорода в виде жидкого аммиака ( $\text{NH}_3$ ) составляет около 5,6 кг/кг  $\text{H}_2$  (в 5,6 кг  $\text{NH}_3$  содержится 1 кг  $\text{H}_2$ ). В установках для получения водорода диссоциацией аммиака применяют катализаторы на основе оксидов железа, и процесс проводят при температуре 600...700 °С. В результате диссоциации получается газовая смесь с объемным содержанием 75 %  $\text{H}_2$  и 25 %  $\text{N}_2$ . Реакция диссоциации

протекает с поглощением теплоты. Необходимый температурный уровень процесса диссоциации поддерживается путем сжигания части получаемого водорода, что снижает эффективность процесса. Подобные условия конверсии обуславливают низкую рентабельность этого процесса при его применении на АТС.

Массовый показатель среды аккумуляции водорода в виде жидкого метанола (масса среды хранения на 1 кг хранимого водорода) составляет около 8,5 кг/кг  $\text{H}_2$ . Для проведения эндотермической реакции конверсии метанола может быть использована (утилизирована) теплота ОГ двигателя. При этом теплота сгорания продуктов конверсии на 21,4 % превосходит теплоту сгорания затраченного метанола, адекватно соответствуя утилизированной теплоте ОГ. В связи с этим появляется реальная возможность осуществления эффективной регенерации теплоты отходящих газов в энергоустановках АТС. Результатами исследований [8] установлено, что за счет эффекта регенерации удастся повысить КПД транспортного двигателя на 12...15 %.

Аналогичным образом могут быть использованы для аккумуляции водорода этанол и высшие спирты, хранение и транспортировка которых хорошо освоены промышленностью. Для транспортного комплекса эти методы аккумуляции водорода оказываются экономически приемлемыми в связи с относительно небольшими затратами на транспортировку и хранение жидких носителей водорода на борту АТС.

В качестве жидких органических сред для многократной организации цикла гидрирования – дегидрирования в целях аккумуляции водорода (жидкие гидриды) могут быть использованы различные системы. В настоящее время наиболее подробно изучены системы бензол – циклогексан и толуол – метилциклогексан [9]. Теоретически для проведения реакций дегидрирования циклогексана и метилциклогексана необходимо

подвести к ним извне теплоту, соответствующую 72 % теплоты сгорания водорода, выделившегося при дегидрировании. Реакции гидрирования бензола и толуола и дегидрирования циклогексана и метилциклогексана протекают экзотермически при температурах 180...400 °С и давлениях 1...10 МПа в зависимости от используемых катализаторов.

Главной проблемой при создании систем аккумулялирования водорода на основе жидких гидридов является разработка дешевых и эффективных катализаторов для реакций гидрирования и дегидрирования. Созданные в последнее время установки для такого аккумулялирования водорода по своей производительности еще не превышают лабораторные масштабы. Разработка промышленных образцов установок – ближайшая перспектива.

Системы аккумулялирования водорода на борту АТС в виде жидких химических соединений, обеспечивающие высокую безопасность в аварийных ситуациях, могут оказаться более востребованными на транспорте, чем существующие методы хранения газообразного и жидкого водорода.

### **Аккумулялирование водорода в адсорбированном состоянии на криоадсорбентах**

При низких температурах (ниже 150 К) газообразный водород активно адсорбируется на многих адсорбентах – активированном угле, силикагеле и др., причем с ростом давления количество адсорбированного водорода увеличивается. Например, при адсорбции водорода на активированном угле при температуре 65 К и давлении 0,2 МПа адсорбируется около 35 г водорода на 1 кг адсорбента, а при давлении 4,2 МПа – около 65 г [10]. В связи с этим возникает возможность увеличить количество аккумуляливаемого газообразного водорода в сосудах под давлением, если эти сосуды будут

заполнены порошком адсорбента и охлаждены до температур кипения азота или аргона. В такой системе, кроме адсорбированного водорода, в мелкопористом пространстве (среда) аккумулялируется и газообразный водород под давлением.

Количество водорода, аккумуляливаемого такими системами, определяется уровнем максимального давления при зарядке и минимального при разрядке. Минимальное давление не может быть меньше атмосферного, а максимальное определяется соответствующей температурой адсорбции. Для активированного угля, являющегося одним из лучших адсорбентов водорода, целесообразен уровень максимального давления 4,2 МПа, а минимального – 0,2 МПа. При работе в этом интервале давлений при температуре 78 К аккумулялируется 4,2 %, а при температуре 65 К – 5,2 % водорода по отношению к массе адсорбента. По массовым характеристикам такие системы превосходят системы хранения водорода под давлением в баллонах и в металлгидридах, однако уступают жидководородным.

Системы аккумулялирования водорода в адсорбированном состоянии на криоадсорбентах начали активно изучаться сравнительно недавно, и в настоящее время еще не создано таких систем опытно-промышленного или промышленного уровня. Техничко-экономические характеристики промышленных систем этого типа и масштабы их возможного использования смогут быть надежно установлены только после проведения соответствующих исследований.

### **Аккумулялирование водорода в инкапсулированном газообразном состоянии**

В последнее время в различных лабораториях мира активно исследуются некоторые нетрадиционные методы хранения и транспортировки газообразного водорода при высоких давлениях

в инкапсулированном состоянии [11]. При этом используется свойство молекулярного водорода активно диффундировать через твердые материалы при высоких температурах и давлениях.

В процессе разработки методов изготовления мишеней для лазерного термоядерного синтеза создана технология изготовления полых стеклянных микросфер диаметром 5...200 мкм с толщиной стенки 0,5...5 мкм. При температуре 200...400 °С под давлением водород, активно диффундируя через стенки, заполняет микросферы и после охлаждения остается в них под давлением. Теоретически возможное давление для таких микросфер составляет около 85...100 МПа, при этом массовое содержание водорода достигает 12 %. Выделение водорода из среды хранения происходит при нагревании микросфер до 200...350 °С. При хранении водорода в стеклянных микросферах потери диффузией через стенки составляют около 0,5 % в сутки. Ведется разработка технологии получения более крупных и прочных стеклянных микросфер диаметром от 50 до 1000 мкм при толщине стенки от 0,6 до 7 мкм с металлическим покрытием внешней поверхности микросфер [11]. При наличии металлических покрытий диффузионные потери водорода из микросфер при комнатной температуре уменьшаются в несколько десятков раз.

В настоящее время методы аккумуляции водорода в инкапсулированном состоянии только начинают изучаться. Возможности и области применения этих методов аккумуляции водорода будут выясняться в процессе их дальнейшей проработки.

### Анализ перспектив развития систем аккумуляции водорода

Широкое развитие водородных энерготехнологических систем на транспорте прогнозируется на первую четверть

XXI столетия [12]. Уровень развития тех или иных систем аккумуляции водорода в перспективе будет определяться затратами не только в подсистемах хранения (резервуары, буферные емкости и т.д.) и энергообеспечения (компрессоры, теплообменники, электрооборудование и т.д.), но и в подсистеме транспортировки энергоносителя и инфраструктуре его распределения.

В условиях эксплуатации автотранспортного комплекса приоритетность отдельных систем аккумуляции водорода в общей структуре водородного энерготехнологического комплекса может быть надежно установлена только в результате анализа работы конкретных систем, включающих производство, аккумуляцию и потребление водорода. Тем не менее определенное представление о перспективности отдельных систем аккумуляции водорода дает уже имеющийся опыт их эксплуатации.

К настоящему времени в ряде зарубежных стран и у нас уже освоено производство систем транспортировки, аккумуляции и распределения жидких носителей водорода, в том числе и таких, как аммиак и метанол. Кроме того, на современном автотранспорте начинает достаточно широко применяться компримированный природный газ в качестве моторного топлива. Развивается широкая сеть газонаполнительных станций. Естественно ожидать, что водородные энерготехнологические системы, по крайней мере на начальном этапе, будут развиваться с максимально возможным использованием существующих систем транспортировки, аккумуляции и распределения энергоносителей, то есть с максимальной экономией затрат.

По итогам развития и результатам совершенствования водородных энерготехнологических систем в дальнейшем будут установлены наиболее приемлемые для АТС варианты этих систем и масштабы их возможного использования на транспорте. На

ближайший период перспективными могут оказаться системы бортового хранения водорода в газообразном состоянии в легких (пластиковые и металлопластиковые) баллонах при высоких давлениях (80...100 МПа), в химически связанном жидком состоянии (метанол, аммиак, жидкие гидриды), в комбинированных металлгидридных аккумуляторах и в сжиженном состоянии в криогенных емкостях.

В целом, анализируя технико-экономические возможности рассмотренных в статье способов и систем аккумуляции водорода, можно заключить, что во всех случаях они связаны с необходимостью разработки сложной, достаточно рентабельной и развитой среды производства, распределения и бортового хранения водорода. Как следует из анализа, в настоящее время эти проблемы, сопряженные

с большим объемом капиталовложений, до конца еще не решены в мировой структуре автотранспортных технологий.

С учетом существующего состояния отечественной транспортной водородной энергетики к наиболее приоритетным и экономически оправданным направлениям ее развития на ближайший период следует отнести перспективные разработки эффективных методов, процессов и аппаратов для бортового синтеза водорода из жидких носителей [1, 8]. Реализация бортовых методов аккумуляции водорода в химически связанном состоянии в жидких средах существенно минимизирует затраты в подсистемах энергообеспечения транспорта, особенно в инфраструктуре распределения водорода, а также радикально решает проблему эксплуатационной безопасности.

## Литература

1. **Мальшенко С.П., Назарова О.В.** Аккумуляция водорода // Атомно-водородная энергетика и технология. Сборник статей. Вып. 8. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 155-205.
2. **Gordon R.** Composite pressure vessels for gaseous hydrogen powered vehicles // Hydrogen Energy Progress V. – 1984. – Vol. 3. – P. 1225-1236.
3. **Wallace J.S.** A comparison of compressed hydrogen and CNG storage // Int. Journ. Hydrogen Energy. – 1984. – Vol. 9. – № 7. – P. 609-611.
4. **Baker C.R., Chaner R.L.** A study of the efficiency of hydrogen liquefaction // Int. Journ. Hydrogen Energy. – 1978. – Vol. 3. – № 4. – P. 321-334.
5. **Turillon P.P.** Design of hydride containers for hydrogen storage // Hydrogen Energy Progress IV. – 1982. – Vol. 3. – P. 1289-1305.
6. **Huston E. Lee.** Liquid and solid storage of Hydrogen // Hydrogen Energy Progress V. – 1984. – Vol. 3. – P. 1171-1186.
7. **Шейпак А.А., Кабалкин В.Н., Семенов К.Н.** Применение гидридов интерметаллических соединений в автомобилях // Автомобильное производство. Сер. С-11. – 1984. – № 7. – С. 15-18.
8. **Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хергеledжи М.В.** Бортовое генерирование водородосодержащего газа для транспортных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 2 (32). – С.41-47.
9. **Cactiola G., Gioidano N., Restuccia G.** Cyclohexane as a liquid phase carrier in hydrogen storage and transport // Int. Journ. Hydrogen. Energy. – 1984. – Vol. 9. – № 5. – P. 411-419.
10. **Carpetis C., Peschka W.** A study on hydrogen storage by use of cryoadsorbent // Hydrogen Energy System. – 1978. – Vol. 3. – P. 1433-1456.
11. **Fraenkel D.** Encapsulate Hydrogen // Chemtech. Jan. issue. – 1981. – P. 60-62.
12. **Дмитриев А.Л.** Экономические и технические проблемы развития водородного транспорта с целью улучшения экологического состояния окружающей среды // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. – 2004. – №1 (9). – С. 14-18.

# Инновационный проект «Газпром газэнергосеть» по производству СПГ в Прикамье

54

9 декабря 2014 г. Группа компаний «Газпром газэнергосеть» ввела в эксплуатацию комплекс производства сжиженного природного газа (СПГ) в Карагайском районе Пермского края и три станции приема, хранения и регазификации природного газа (СПХР) в населенных пунктах Ильинский, Нердва, Северный Коммунар.



Участники открытия комплекса



Комплекс производства СПГ в Пермском крае

Строительство производственных объектов осуществлено в ходе реализации пилотного проекта автономного газоснабжения сжиженным природным газом в рамках Программы газификации регионов РФ.

В церемонии торжественного открытия комплекса производства СПГ приняли участие губернатор Пермского края Виктор Басаргин, член правления ОАО «Газпром», начальник департамента по работе с органами власти РФ Владимир Марков, генеральный директор ОАО «Газпром газэнергосеть» Андрей Дмитриев, главы муниципальных образований края, представители сбытовых, строительных и газораспределительных компаний.

При производстве СПГ в Карагайском районе используются уникальные криогенные технологии, которые отличаются безопасностью, надежностью, минимальными операционными затратами и простотой эксплуатации. Ранее сжиженный природный газ в проектах газификации регионов Газпромом не использовался. Эти

технологии позволяют транспортировать газ без прокладки магистральных трубопроводов. Объем газа в жидком состоянии уменьшается в 600 раз. С комплекса сжижения природного газа полученный СПГ доставляется автоцистернами на СПХР в поселках Ильинский, Нердва и Северный Коммунар. Там СПГ сливается в резервуары, переводится в газообразное состояние, подогревается, одорируется и по газопроводам низкого давления подается в котельные для выработки тепла и в дома для приготовления пищи.

Получаемый на комплексе продукт по своим энергетическим и экологическим свойствам аналогичен метану в газообразном состоянии и обеспечивает высокую теплоту сгорания, максимально возможный КПД для котлов, возможность автоматизации учета газа, отсутствие вредных выбросов при сгорании топлива. При этом потребители будут получать газ по гибкой схеме в зависимости от текущего спроса, а это означает, что за счет имеющейся системы хранения топлива производитель сможет независимо от перепадов потребления обеспе-

чивать стабильность снабжения им. Планируется, что в поселки Ильинский, Нердва и Северный Коммунар будет поставляться около 19 млн м<sup>3</sup> газа в год, который пойдет на нужды 9 котельных и 2,2 тыс. домовладений.

Пока СПГ, производимый на установке сжижения, будет направляться только для целей газо- и теплоснабжения населения. Однако, как известно, сферы использования сжиженного природного газа намного шире. Одна из наиболее перспективных – использование СПГ в качестве газомоторного топлива.



Автоцистерна для перевозки СПГ

По словам начальника департамента по работе с органами власти РФ ОАО «Газпром» Владимира Маркова, запуск комплекса производства СПГ в Пермском крае – это один из примеров продолжающейся индустриализации страны. «Это наш первый опыт эксплуатации подобных объектов, – сообщил он на открытии комплекса, – и для нас, безусловно, важно обеспечить загрузку завода, доставить газ потребителям, но первостепенными задачами являются освоение технологии, обучение специалистов, что позволит в дальнейшем тиражировать этот проект в других регионах».



Генеральный директор ОАО «Газпром газэнергосеть» Андрей Дмитриев сравнил по сложности опыт запуска пермского комплекса с заводом по сжижению гелия, который компания ввела в промышленную эксплуатацию летом прошлого года. В обоих проектах использованы технологии сжижения газа при сверхнизких температурах.

– Я бы хотел обратить внимание не только на технологии и инновации, но и на бесценный опыт, который мы получили при реализации данного проекта. Несколько месяцев назад компания «Газпром газэнергосеть» запустила завод по сжижению гелия в Оренбурге, где температура сжижения была близка к абсолютному нулю. При строительстве комплекса производства СПГ в Пермском крае задача не упростилась. Технологии схожие, но СПГ – другой продукт, с другими свойствами и особенностями производства, хранения и транспортировки, – сказал Андрей Дмитриев.



Слева направо: генеральный директор ОАО «Газпром газэнергосеть» Андрей Дмитриев, губернатор Пермского края Виктор Басаргин, член правления ОАО «Газпром» Владимир Марков, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Чайковский» Виктор Чичелов

Сегодня все объекты в рамках проекта автономной газификации в Пермском крае введены в эксплуатацию и обеспечивают газом потребителей региона. Следует отметить, что стоимость этого продукта будет такой же, как и для потребителей сетевого газа.



## Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, работающего на водотопливной эмульсии

**В.А. Марков**, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.,  
**В.А. Шумовский**, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
**В.С. Акимов**, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрена возможность использования водотопливных эмульсий в качестве топлива для дизелей. Приведена конструкция эмульгирующего устройства, используемого для получения водотопливной эмульсии. Проведен анализ физико-химических свойств исследуемых водотопливных эмульсий. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С, работающего на дизельном топливе и водотопливных эмульсиях различного состава. Проведены расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, работающего на водотопливной эмульсии.

**Ключевые слова:**

дизельный двигатель, дизельное топливо, водотопливная эмульсия, процесс топливоподачи, распыливание топлива, смесеобразование, распылитель.

**Н**а современном этапе развития двигателестроения одной из наиболее острых и актуальных проблем является снижение выбросов токсичных веществ с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания [1]. В дизельных двигателях основными токсичными компонентами ОГ являются оксиды азота и сажа, причем на долю оксидов азота приходится до 95 % суммарной токсичности ОГ [2]. При этом около 42 % выбросов оксидов азота в атмосферу приходится на автомобильный транспорт [3]. Поэтому при выборе мероприятий, обеспечивающих снижение токсичности ОГ, особую значимость имеют те, которые обеспечивают уменьшение образования оксидов азота в камере сгорания (КС) дизеля.

При температурах выше 2000 К химически инертный в нормальных условиях азот реагирует с кислородом воздуха с образованием преимущественно монооксида азота NO. На форсированных режимах быстроходных дизелей максимальные температуры сгорания превышают 2000 К, поэтому создаются благоприятные условия для образования монооксида азота в КС. В выпускной системе дизеля часть монооксида азота окисляется до диоксида. В результате из оксидов азота NO<sub>x</sub>, содержащихся в ОГ дизелей, 80...90 % приходится на монооксид NO и 10...20 % – на диоксид NO<sub>2</sub>.

Содержание других газообразных оксидов азота (N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в ОГ ничтожно мало [1].

Поскольку образование монооксида

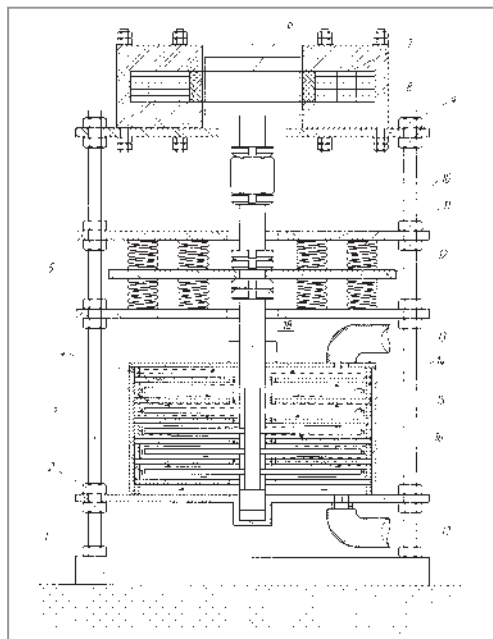
азота в КС происходит с поглощением теплоты, определяющее влияние на эмиссию этого токсичного компонента с ОГ оказывает именно температура сгорания. Поэтому для снижения содержания оксидов азота в ОГ дизелей необходимо снижать максимальные температуры сгорания топлива. Это достигается при использовании в качестве топлива для дизелей эмульгированных топлив – эмульсий дизельного топлива (ДТ) и водотопливных эмульсий (ВТЭ) [2]. Высокая теплота парообразования при испарении воды в КС способствует снижению температур сгорания.

Преимуществом этого вида топлива является не только возможность значительного снижения выбросов с ОГ оксидов азота, но и при определенных условиях улучшение показателей топливной экономичности дизеля [2, 4, 5]. Кроме того, необходимо отметить широкую доступность воды и отсутствие расходов на ее приобретение. В связи с этим проведены многочисленные исследования по использованию ВТЭ в автомобильных дизельных двигателях, автотракторных дизелях и судовых двигателях [6-10].

Вместе с тем необходимо отметить и некоторые недостатки ВТЭ как моторного топлива. Основной из них заключается в том, что нефтяные моторные топлива не смешиваются между собой, а приготовление водотопливной эмульсии и обеспечение ее стабильности представляет собой сложную техническую проблему.

Для получения эмульсий нефтяного ДТ и воды авторами статьи использовано эмульгирующее устройство, показанное на рис. 1 [4, 5]. Оно включает основание 1 в виде массивной плиты, на которой закреплены четыре направляющие стойки 3, выполненные в виде прутков, снабженных метрической резьбой по всей длине. Реактор 15 выполнен в виде цилиндрической емкости с верхней 13 и нижней 16 крышками. Каждая из крышек снабжена патрубком 17, предназначенным для впуска и выпуска реакционных сред.

Нижняя крышка 16 имеет фланец, выходящий за габарит реактора 15, с четырьмя отверстиями для стоек 3. Фиксация реактора 15 осуществляется с помощью гаек 2. В реакторе 15 установлен ряд чередующихся неподвижных 4 и подвижных 14 дисков. Последние посредством штока 18 связаны с якорем 6 электромагнитного двигателя, статор 7 которого посредством фланца 8 связан со стойками 3 с помощью гаек 9. Между якорем 6 и реактором 15 на стойках 3 смонтированы три параллельных диска: внешние 5 и внутренний 12. Внешние диски фиксируются на стойках 3 с помощью гаек 11, а внутренний диск закреплен на штоке 18 на равном расстоянии от внешних дисков. В промежутках между дисками установлены пружины 10, в совокупности с дисками образующие упругую систему устройства.



**Рис. 1.** Схема эмульгирующего устройства: 1 – основание; 2, 9, 11 – гайки; 3 – направляющие стойки; 4 – неподвижные диски; 5 – внешние диски; 6 – якорь электромагнитного двигателя; 7 – статор электромагнитного двигателя; 8 – фланец; 10 – пружины; 12 – внутренний диск; 13 – верхняя крышка; 14 – подвижные диски; 15 – реактор; 16 – нижняя крышка; 17 – патрубок; 18 – шток

Эмульгирующее устройство работает следующим образом. Через верхний патрубок 17 (рис. 1) в реактор вводятся среды, подлежащие перемешиванию – ДТ и вода. При поступлении их в реактор включают электромагнитный двигатель, якорь 6 которого совершает колебательные движения с заданной частотой и амплитудой. Они в конечном итоге и определяют свойства получаемой водотопливной эмульсии. Колебательные движения якоря 6 через шток 18 передаются на подвижные диски 14, которые перемещаются между неподвижными дисками 4, изменяя объем пространства между ними. Это вызывает попеременное растяжение и сжатие сред, находящихся между дисками, их турбулизацию и возбуждение в средах кавитационных пузырьков. Все это способствует тщательному перемешиванию ДТ и воды.

Для снижения энергоемкости процесса перемешивания расчетным или

экспериментальными методами определяется частота собственных колебаний подвижной части устройства путем изменения затяжки пружин 10 упругой системы. За счет перемещения внешних дисков 5 относительно внутреннего диска 12 осуществляется корректировка собственной частоты подвижной части устройства, которая приближается к фиксированной частоте вынуждающей силы, развиваемой якорем 6, что позволяет добиться резонансного режима работы устройства. Размещение устройства на направляющих стойках с возможностью перемещения его основных узлов значительно облегчает его сборку и выполнение различных регулировок, например, расстояния между подвижными и неподвижными дисками в реакторе, магнитного зазора между якорем и статором электромагнитного двигателя и др.

Для получения стойких эмульсий этих компонентов применен эмульгатор

Таблица 1

## Физико-химические свойства ДТ, воды и эмульгированных топлив

Физико-химические свойства	ДТ	Вода	92,5 % ДТ + 7,5 % воды	85,0 % ДТ + 15,0 % воды
Молярная масса, кг/кмоль	170	18	–	147,2
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830,0	998,2	842,6	855,2
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	1,0	–	4,4*
Вязкость динамическая при 20 °С, мПа·с	3,154	1,002	–	3,798*
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ при 20 °С, мН/м	27,1	72,7	–	–
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	–	39,3	36,1
Цетановое число	45	–	–	–
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,30	–	11,51	10,89
Содержание, % по массе				
С	87,0		80,5	74,0
Н	12,6		11,6	10,7
О	0,4		0,4	0,3
H <sub>2</sub> O	0	100	7,5	15,0
Общее содержание серы, % по массе	0,200	0	0,185	0,170
Теплоемкость $C_p$ при 20 °С, кДж/(кг·К)	2,1	4,2	–	2,415
Теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	0,12	0,60	–	0,192

Примечание: «–» – свойства не определялись или не приведены; для смеси ДТ и воды указано объемное процентное содержание компонентов; \* вязкость эмульсии определена по формуле Тейлора

алкенилсукцинимид мочевины (СИМ), производимый по ТУ 38.1011039–85. Он представляет собой вязкую прозрачную растворимую в углеводородах жидкость светло-коричневого цвета. Содержание эмульгатора в эмульгированных топливах не превышало 0,5 % (масс.). Полученные эмульсии были достаточно стабильны: расслоение их на две фракции происходило лишь после нескольких недель хранения. Однако первоначальный вид и свойства эмульсии восстанавливались путем ее простого взбалтывания. Физико-химические свойства ДТ, воды и эмульгированных топлив различного состава представлены в табл. 1.

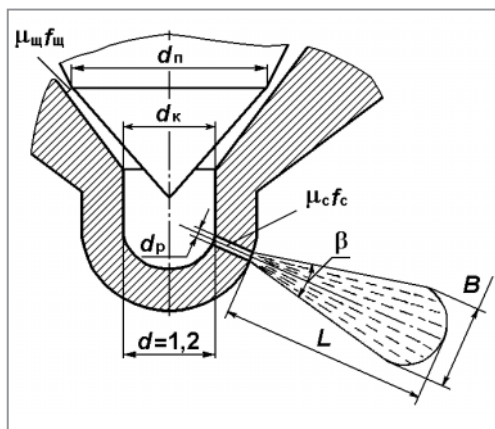
Проведенные авторами статьи экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода подтвердили эффективность использования этого вида моторного топлива [4, 5]. Так, при работе дизеля на режимах 13-ступенчатого цикла Правил ЕСЕ R49 и переходе с ДТ на эмульсии с содержанием воды  $C_b$  15,0 % удельный массовый выброс оксидов азота  $e_{NOx}$  уменьшился с 6,610 до 4,849 г/(кВт·ч), то есть на 26,6 %, а условный интегральный на режимах 13-ступенчатого цикла эффективный КПД дизеля  $\eta_e$  повысился с 0,341 до 0,361, или на 5,9 %. При этом удельный массовый выброс монооксида углерода  $e_{CO}$  возрос с 3,612 до 4,648 г/(кВт·ч), а выброс несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  – с 1,638 до 2,522 г/(кВт·ч). Вместе с тем при переходе с ДТ на эмульсию с содержанием воды  $C_b=15,0$  % на режиме максимального крутящего момента при  $n=1500$  мин<sup>-1</sup> дымность ОГ  $K_x$  снизилась с 28,0 до 18,0 %, а на режиме максимальной мощности при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup> – с 16,0 до 8,5 % по шкале Хартриджа.

Одной из причин роста выбросов монооксида углерода  $e_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $e_{CH}$  при работе двигателя на ВТЭ являются различия физико-химических свойств традиционного нефтяного ДТ и исследованной эмульсии

(см. табл. 1), которые, безусловно, сказываются на протекании рабочих процессов двигателя. При этом важнейшими процессами, предопределяющими возможность достижения необходимых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизельных двигателей, являются топливоподача, распыливание топлива и смесеобразование. Это обусловлено тем, что указанные показатели могут быть достигнуты лишь при обеспечении высокой гомогенности топливовоздушной смеси в цилиндрах дизеля. Поэтому актуальной остается проблема дальнейшего совершенствования процесса и системы топливоподачи дизельных двигателей, особенно при их адаптации к работе на различных альтернативных топливах.

Одним из основных элементов этой системы является распылитель форсунки, формирующий струи с требуемыми геометрическими размерами, структурой и показателями мелкости распыливания топлива. При этом характеристики струй распыливаемого топлива (длина  $L$ , ширина  $B$  и угол конуса  $\beta$  струи, направление и динамика ее распространения, рис. 2) должны быть согласованы с формой камеры сгорания с целью равномерного распределения топлива по ее объему.

Известно, что для качественного распыливания топлива и последующего смесеобразования желательно обеспечить высокие давления впрыскивания и турбулизацию потока топлива в проточной части распылителя форсунки [11–13]. Повышенные энергетические показатели потока топлива на выходе из распыливающих отверстий приводят к турбулизации струи распыливаемого топлива, ее быстрому распаду в КС дизеля и улучшению показателей распыливания и смесеобразования. Однако экспериментальные исследования потока топлива в элементах системы топливоподачи достаточно трудоемки и требуют применения специальных стендов и высокоточной измерительной аппаратуры [14].



**Рис. 2.** Схема расположения дроселирующих сечений распылителя форсунки и геометрические характеристики струи распыливаемого топлива:

$\mu_{ш}f_{ш}$  – эффективное сечение щели между запорными конусами иглы и седла;  $\mu_c f_c$  – эффективное сечение сопловых отверстий

Для определения энергетических показателей потока топлива в проточной части распылителей форсунок применен расчетный метод, основанный на использовании программного комплекса Ansys CFX 12.0 [15-17]. Исследовано течение топлива в проточной части серийного распылителя 145.1112110 форсунки типа ФДМ-22 упомянутого выше дизеля Д-245.12С при его работе на нефтяном ДТ и ВТЭ, содержащей 85 % дизельного топлива и 15 % воды (см. табл. 1).

Серийный распылитель 145.1112110 выполнен с диаметром иглы  $d_{и}=5,0$  мм (по направляющей). Максимальный ход

иглы составляет  $h_{и}=0,26$  мм. Хвостовик распылителя имеет три конусных участка с различными углами, равными 45, 60 и 90°. Посадка иглы на седло распылителя осуществляется по диаметру  $d_{и}=2,8$  мм (см. рис. 2). Ниже посадочного диаметра хвостовик имеет конусную часть с углом конуса 60°. Корпус распылителя имеет пять распыливающих отверстий диаметром  $d_p=0,32$  мм, входные кромки которых расположены в колодце распылителя диаметром  $d_k=1,2$  мм. Суммарная эффективная площадь распылителя в сборе (с учетом  $\mu_{ш}f_{ш}$  и  $\mu_c f_c$ ) составляет  $\mu_p f_p=0,278$  мм<sup>2</sup>. Расположение распыливающих отверстий серийного распылителя типа 145.1112110-11 приведено в табл. 2.

Проведенные экспериментальные исследования дизеля типа Д-245.12С, результаты которых приведены в работах [4, 5], не позволили определить влияние свойств применяемого топлива на показатели процесса топливоподачи и энергетические показатели потока топлива в форсунках.

Для оценки влияния свойств применяемого топлива на параметры потока и его турбулизацию в проточной части распылителя форсунки был проведен численный эксперимент, в ходе которого моделировалось течение в проточной части серийного распылителя 145.1112110 форсунки типа ФДМ-22 дизеля Д-245.12С при его работе на нефтяном ДТ и ВТЭ,

Таблица 2

### Расположение распыливающих отверстий распылителя типа 145.1112110

№ отверстия	Угловое расположение отверстия относительно штифта, градус	Угол наклона отверстия относительно оси распылителя, градус
1	8	62
2	90	71,5
3	172	62
4	237	52
5	303	52

содержащей 85 % дизельного топлива и 15 % воды (см. табл. 1). При этом использованы справочные данные работ [18-20]. При расчете теплоемкости и теплопроводности эмульсии принималось, что в смесях эти физические свойства компонентов аддитивны. Вязкость эмульсии определялась по формуле Тейлора в виде

$$\mu_э = \mu_{дт} \left( 1 + 2,5 C_v \frac{\mu_в + 0,4\mu_{дт}}{\mu_в + \mu_{дт}} \right),$$

где  $\mu_{дт}$ ,  $\mu_в$ ,  $\mu_э$  – динамическая вязкость дизельного топлива, воды и эмульсии соответственно.

Расчет проводился в программном комплексе Ansys CFX 12.0, математическая модель которого содержит уравнения в частных производных, описывающих поток топлива в проточной части распылителя, а также уравнения неразрывности, количества движения Навье–Стокса, энергии и диффузии, уравнения модели турбулентности.

Для оценки степени турбулизации потока использовалась величина турбулентной кинетической энергии (удельная кинетическая энергия вихрей в турбулентном потоке)  $k$ , которая физически характеризуется среднеквадратической флуктуацией (пульсация) скорости

$$k = \frac{\overline{U'^2} + \overline{V'^2} + \overline{W'^2}}{2},$$

где  $\overline{U'}$ ,  $\overline{V'}$ ,  $\overline{W'}$  – среднеквадратичные значения проекций пульсационной составляющей скорости на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Влияние турбулентности на характеристики течения очень велико, поэтому в систему уравнений введена модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$ , включающая в себя уравнения, которые наиболее точно описывают рассматриваемые явления. Кинетическая энергия турбулентности  $k$  определяется как разность во флуктуациях скорости ( $m^2/c^2$ ), турбулентная диссипация вихря  $\epsilon$  – показатель, при котором пульсации скорости рассеиваются ( $m^2/c^3$ ).

При расчетах исследован стационарный поток топлива в распылителях. В качестве расчетной области (рис. 3) выбрана проточная часть между хвостовиком иглы и седлом распылителя при максимально поднятой игле. Для уменьшения времени счета использована четверть расчетной области, при этом на границах этой области заданы условия симметрии.

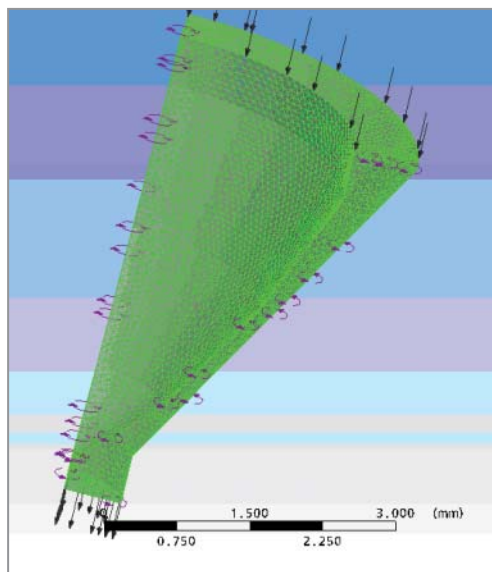


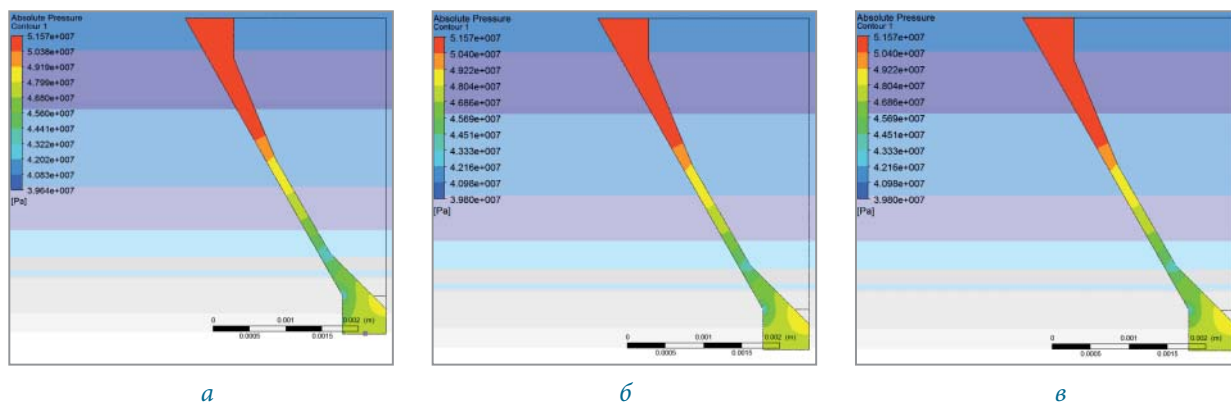
Рис. 3. Расчетная область проточной части распылителей форсунки

Давление топлива на входе в расчетную область было принято равным 51,5 МПа, что примерно соответствует максимальному давлению впрыскивания, обеспечиваемому разделенной системой топливоподачи дизеля типа Д-245.12С на номинальном режиме (при частоте вращения коленчатого вала  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  и цикловой подаче топлива  $q_{ц}=80 \text{ мм}^3$ ). Расход топлива через распылитель принят равным 0,08 кг/с, что соответствует максимальному расходу топлива через форсунку дизеля типа Д-245.12С на указанном номинальном режиме. При расчетах граничные условия оставались неизменными для обоих видов исследуемых топлив (ДТ и ВТЭ).

В ряде работ показано, что на характеристики течения топлива в элементах

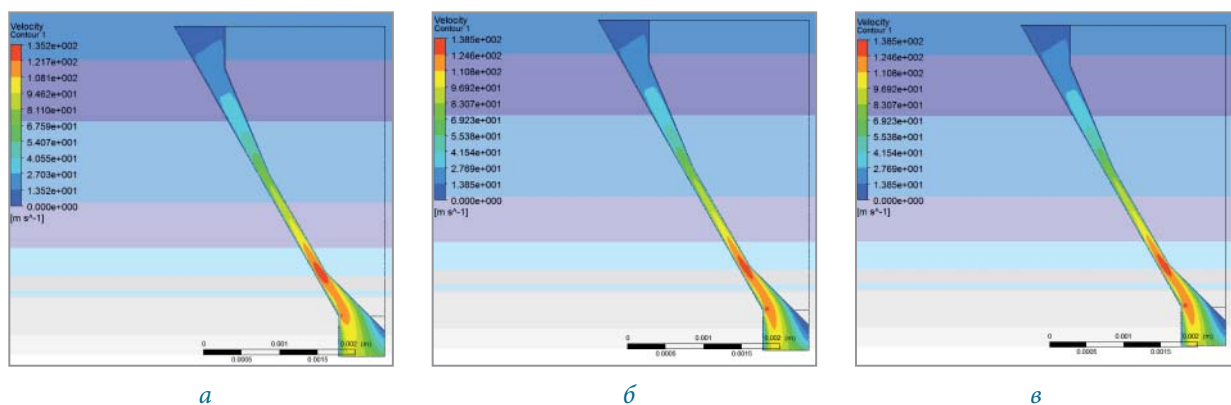
системы топливоподачи и показатели рабочего процесса дизеля и его систем влияет структура водотопливной эмульсии [21, 22]. В связи с этим расчетные исследования проведены для ВТЭ с диаметром капель воды в эмульсии 50 и 5 мкм.

Полученная при расчетных исследованиях картина течения топлива в проточных частях исследованных распылителей (распределение давлений, скоростей, турбулентной кинетической энергии потока топлива) представлена на рис. 4-6.



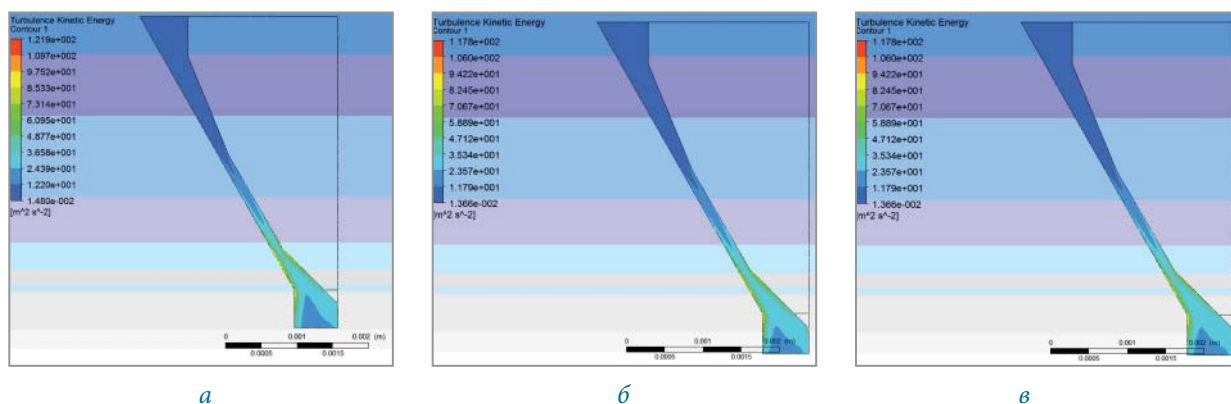
**Рис. 4.** Распределение давлений топлива в проточных частях распылителей форсунки:

*a* – дизельное топливо; *б* – ВТЭ с диаметром капель воды 50 мкм; *в* – ВТЭ с диаметром капель воды 5 мкм



**Рис. 5.** Поля скоростей потока топлива в проточных частях распылителей форсунки:

*a* – дизельное топливо; *б* – ВТЭ с диаметром капель воды 50 мкм; *в* – ВТЭ с диаметром капель воды 5 мкм



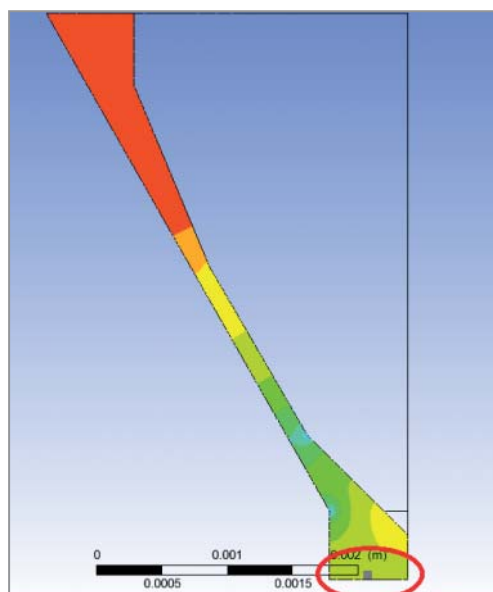
**Рис. 6.** Значения турбулентной кинетической энергии потока топлива в проточных частях распылителей форсунки (*k*- $\epsilon$  – модель турбулентности):

*a* – дизельное топливо; *б* – ВТЭ с диаметром капель воды 50 мкм; *в* – ВТЭ с диаметром капель воды 5 мкм

Картина течения в проточных частях исследованных распылителей (см. рис. 4-6) достаточно предсказуема. По распределениям давлений, скоростей и турбулентной кинетической энергии потока топлива можно констатировать, что существуют различия указанных распределений в распылителе при работе на исследуемых видах топлива, но они не носят глобального характера. Во всех рассматриваемых случаях наибольшие скорость и турбулизация потока топлива отмечены в районе кольцевой щели между иглой распылителя и ее посадочным конусом (седло). Но наибольший интерес представляют параметры потока на входе в распыливающие отверстия, которые и определяют качество распыливания топлива и последующего смесеобразования. На рис. 7 эта область отмечена кружком.

Результаты анализа параметров потока исследуемых топлив в указанной на рис. 7 расчетной точке сведены в табл. 3. Эти данные свидетельствуют о том, что при использовании эмульгированных топлив наблюдаются максимальные давления топлива на входе в распыливающие отверстия. При переходе от нефтяного ДТ на ВТЭ с 15%-ным содержанием воды это давление увеличилось с 47,6 до 47,8...47,9 МПа (в зависимости от диаметра капель). Впрочем, следует отметить, что в рассматриваемом случае структура эмульсии (диаметр капель воды в ней) оказывает слабое влияние на характеристики течения топлива. Хотя увеличение давления

в расчетной точке оказалось не очень значительным, но и этот рост давления впрыскивания способствует более качественному распыливанию топлива.



**Рис. 7.** Расчетная точка на входе в распыливающее отверстие форсунки

При использовании эмульгированных топлив несколько снизилась скорость потока топлива в расчетной точке и возросла турбулентная кинетическая энергия потока на входе в распыливающее отверстие (примерно на 0,5...1,5 %). Однако наибольшая турбулизация струи эмульгированного топлива, значительно улучшающая процесс смесеобразования, наблюдается уже на выходе из распыливающего отверстия за счет возникновения так называемых «микровзрывов» в условиях

*Таблица 3*

### Сводная таблица результатов расчетных исследований в расчетной точке

Вид топлива	Давление, МПа	Скорость, м/с	Турбулентная кинетическая энергия, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Нефтяное ДТ	47,6	93,3	18,2
ВТЭ (85 % ДТ + 15 % воды) с диаметром капель воды 50 мкм	47,8	82,6	18,5
ВТЭ (85 % ДТ + 15 % воды) с диаметром капель воды 5 мкм	47,9	83,1	18,3



повышенных температур в КС [2]. Их появление обусловлено тем, что капли эмульгированного топлива состоят из частиц, внутри которых располагается большое количество хаотически движущихся включений воды. При температурах, превышающих температуру кипения воды, эти включения быстро испаряются, что приводит к микротурбулизации топливоздушную смеси, снижению расхода топлива, уменьшению содержания в ОГ продуктов неполного сгорания. Кроме того, присутствие значительного количества паров воды в зонах КС с недостатком кислорода препятствует крекингу топлива при высоких температурах, а также способствует газификации образовавшегося ранее углерода, что приводит к значительному уменьшению сажеобразования. Наблюдаемое при подаче воды в цилиндры дизеля снижение температур сгорания благоприятно сказывается на выбросах с ОГ оксидов азота.

Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований

подтверждают перспективность использования эмульгированных топлив в дизелях транспортного назначения. Исследования также показали, что при переходе от нефтяного ДТ на ВТЭ с 15%-ным содержанием воды наблюдается небольшое увеличение давления перед распыливающими отверстиями форсунки, немного возрастает и турбулентная кинетическая энергия потока топлива на входе в распыливающее отверстие. Указанный рост давления впрыскивания и турбулентной кинетической энергии при использовании ВТЭ способствует более качественному распыливанию топлива. Дополнительная турбулизация потока достигается уже в камере сгорания за счет быстрого испарения капель воды из эмульгированного топлива. При переходе от нефтяного дизельного топлива на водотопливные эмульсии удельный массовый выброс оксидов азота снижается на 20...30 %. Применение ВТЭ позволяет также снизить дымность ОГ на 40...50 %.

## Литература

1. **Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.** Токсичность отработавших газов дизелей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
2. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. Под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 791 с.
3. **Чертков Я.Б.** Моторные топлива. – Новосибирск: Наука, 1987. – 208 с.
4. **Марков В.А., Девянин С.Н., Шумовский В.А. и др.** Работа дизелей на водотопливных эмульсиях // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 3. – С. 67-71.
5. **Марков В.А., Тарантин С.А., Девянин С.Н.** Использование водотопливных эмульсий в качестве топлива для дизелей // Грузовик. – 2012. – № 8. – С. 33-42.
6. **Малов Р.В., Пекшев В.В.** Эмульгирование топлива и экологические характеристики дизеля // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 8. – С. 15-18.
7. **Лиханов В.А., Сайкин А.М.** Снижение токсичности автотракторных дизелей. – М.: Колос, 1994. – 224 с.
8. **Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д.** Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1988. – 105 с.
9. **Kee S.-S., Mohammadi A., Hirano H.** Experimental Study on Combustion Characteristics and Emissions Reduction of Emulsified Fuels in Diesel Combustion Using a Rapid Compression Machine // SAE Technical Paper Series. – 2003. – № 2003-01-1792. – P. 1-8.
10. **Hountalas D.T., Mavropoulos G.C., Zannis T.C. et al.** Use of Water Emulsion and Intake Water Injection as NOx Reduction Techniques for Heavy Duty Diesel Engines // SAE Technical Paper Series. – 2006. – № 2006-01-1414. – P. 1-15.
11. **Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И.** Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 360 с.

12. **Кутовой В.А.** Впрыск топлива в дизелях. – М.: Машиностроение, 1981. – 119 с.
13. **Трусов В.И., Дмитриенко В.П., Масляный Г.Д.** Форсунки автотракторных дизелей. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.
14. **Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А.** Системы топливоподачи и управления дизелей: учеб. для вузов. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
15. ANSYS CFX, Release 12.1, HELP & Tutorials. Canonsburg (USA): Inc. Release Notes, 2009. – 58 p.
16. **Марков В.А., Стремяков А.В., Акимов В.С., Шумовский В.А.** Метод улучшения качества распыливания топлива в дизеле, работающем на смешанном биотопливе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 2. – С. 24-29.
17. **Марков В.А., Стремяков А.В., Акимов В.С., Шумовский В.А.** Расчетные исследования процесса топливоподачи дизеля, оснащенного распылителями форсунок с различной геометрией проточной части // Грузовик. – 2011. – № 3. – С. 13-17.
18. Справочник химика. Том 2. Основные свойства неорганических и органических соединений / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин и др. Под ред. Б.П. Никольского. 3-е изд. – Л.: Химия, 1971. – 1168 с.
19. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
20. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
21. **Аттия А.М.А., Кульчицкий А.Р.** Управление структурой водотопливной эмульсии // Research papers of Lithuanian University of Agriculture. – 2012. – Vol. 46. – № 2-3. – P. 112-126.
22. **Аттия А.М.А., Кульчицкий А.Р.** Улучшение экологических и экономических показателей дизеля за счет изменения структуры водотопливной эмульсии: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Владимир: изд-во ФГОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», 2012. – 20 с.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ISSN 2306-8949

# ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ

В издательстве ООО «Газпром ВНИИГАЗ» готовится к выпуску научно-технический сборник «Вести газовой науки» № 1 (21) 2015 «Современные технологии переработки и использования газа».

Настоящий выпуск охватывает две обширные и взаимопересекающиеся темы – переработка и использование газа.

В сборнике подробно рассмотрены задачи как первичной переработки с получением очищенного газа, так и вторичной с получением целевых продуктов. Описаны результаты исследований по повышению эффективности очистки газа от сероводорода и диоксида углерода с предложением оригинальных технологий вакуумной очистки аминов и тонкого извлечения из газа диоксида углерода. Освещены проблемы разработки современных технологий конверсии углеводородсодержащих газов в жидкие продукты топливного и нефтехимического назначения и др.

Отражен широкий спектр вопросов по современным технологиям использования газа, касающихся ожижения магистрального природного газа в малотоннажных криосистемах с роторным волновым криогенератором, моделирования режимов заправки криогенного емкостного оборудования и др. Представлен анализ требований к качеству газомоторного топлива и исходному сырью.

Публикуются статьи специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Криогенмаш», ООО «Компрессор», ЗАО ГК «РусьГазИнжиниринг», ЗАО «Гравиразведка» и других организаций.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов нефтегазового профиля, а также студентов, магистрантов и аспирантов нефтегазовых специальностей высших учебных заведений.

## ГБА и баллоны

ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры» является одним из крупнейших в Республике Беларусь и СНГ предприятий, специализирующихся на производстве аппаратуры для перевода легковых и грузовых автомобилей на сжатый (КПГ) и сжиженный (СПГ) газ, тороидальных и цилиндрических автомобильных баллонов всех популярных типоразмеров, бытовых газовых баллонов, запорно-редуцирующей арматуры, счетчиков газа, в том числе с электронным термокомпенсатором, порошковых огнетушителей, товаров народного потребления.

Предприятие более 50 лет занимается проектированием и производством газовых баллонов и на протяжении 25 лет – выпуском газобаллонной аппаратуры для перевода легковых и грузовых автомобилей на СПГ и КПГ.

Газобаллонная аппаратура (ГБА) 4-го поколения производства «NOVOGAS» представлена полными комплектами ГБА и миникомплектами. ГБА комплектуется дифференциальным испарителем-регулятором (с обратной связью от разрежения во впускном коллекторе), газовым электромагнитным клапаном, командоконтроллером последовательного впрыска газа, датчиками дифференциального давления и температуры, рампой газовых форсунок, фильтром тонкой очистки газа. Сюда же входят комплекты трубопроводов, рукавов, электропроводов, ложементы (или кронштейны) крепления баллонов и металлоизделия монтажные с крепежом. Также в комплект может входить газовый баллон тороидальной или цилиндрической формы. Предприятие использует электронные комплектующие ведущих западных производителей.

Аппаратура может применяться как в автомобилях, оснащенных новейшей диагностической системой подачи топлива OBD2 (EOBD), так и на более ранних моделях. Аппаратура сертифицирована по Евростандартам.

Благодаря современной конструкции и высокопроизводительному процессу ГБА обеспечивает выполнение строгих стандартов выбросов выхлопных газов при одновременном сохранении динамики езды бензинового режима.

Преимущества ГБА общеизвестны. Кроме прямой экономии денежных средств (газовое топливо дешевле бензина), имеется ряд преимуществ при эксплуатации автомобиля:

- уменьшение нагрузки на кривошипно-шатунный механизм;
- увеличение межремонтного периода работы двигателя;
- снижение уровня шума работы двигателя;
- увеличение срока службы моторного масла, свечей зажигания, запаса хода автомобиля;
- снижение токсичности выхлопных газов.

Не стоит забывать и о противопожарных возможностях газовой аппаратуры, устанавливаемой на инжекторные автомобили: отсоединив легкоъемный коммутатор, можно надежно заблокировать подачу обоих видов топлива при попытке несанкционированного пуска двигателя.

Надежность и качество ГБА «NOVOGAS» подтверждены практическими результатами. Предприятием по контракту с Венесуэлой поставлено и смонтировано 17 тыс. комплектов ГБА 4-го поколения для автомобилей с четырех- и шестицилиндровыми двигателями.

Высокоэффективное импортное оборудование при производстве газовых баллонов используется с момента заготовки деталей: плазменная резка, глубокая вытяжка днищ на 500-тонном гидропрессе, торцовка и зиговка днищ на автоматизированной установке. Все это обеспечивает получение исходных деталей высокого качества. Окончательная отделка поверхности баллонов проводится на автоматизированной линии дробеметной обработки и полимерной покраски.

Такой уровень технологии позволяет выпускать газовые баллоны высокого качества. Они имеют сертификаты качества Республики Беларусь и Российской Федерации, а также сертифицированы на соответствие Европейским стандартам.

Автомобильные газовые баллоны получили разрешение Транспортного технического дозора Польши и допущены к применению как в этой стране, так и в других государствах Евросоюза. Не случайно газовые баллоны производства «NOVOGAS» отмечены дипломами: «Лучшие товары РБ на рынке России», лучший товар в Республике Беларусь в номинации «Новинка года» (тороидальные газовые баллоны), «За достижения в области качества» (производство баллонов на роботизированной линии).

Эти достижения стали возможны во многом благодаря жесткой системе контроля качества продукции, которая сертифицирована согласно требованиям международного стандарта ISO 9001–2009.

В перспективе на ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры» будет введена в эксплуатацию роботизированная линия по производству тороидальных автомобильных баллонов, что позволит значительно расширить линейку типоразмеров этой продукции в целях наибольшего удовлетворения потребностей самого взыскательного покупателя!

**ОАО «Новогрудский завод газовой аппаратуры»**

**231400, Беларусь, г. Новогрудок 109**

**Тел: +375 1597 213 32, 233 23**

**Факс: +375 1597 217 42, 243 42**

**E-mail: [info@novogas.com](mailto:info@novogas.com)**

**[www.novogas.com](http://www.novogas.com)**

### Международная конференция «СПГ 2014»: есть основания для оптимизма

В текущем году Россия попала под «санкционный каток», который может оказать негативное влияние, в частности, на отечественные СПГ-проекты. Но и помимо этого, на внутреннем рынке сжиженного природного газа существует ряд иных трудностей, среди которых вопросы безопасности, транспортировки и экономической целесообразности.

16 декабря в Москве при поддержке Национальной газомоторной ассоциации прошла третья международная конференция «СПГ 2014», организованная компанией CREON Energy. Генеральными информационными партнерами выступили «Российская газета Бизнес» и журнал «Нефть и Капитал», информационным спонсором – журнал «Нефть России».

Открывая традиционно декабрьскую конференцию, генеральный директор CREON Energy **Санджар Тургунов** обратился к участникам с приветственным словом, призвав основной упор сделать на обсуждении темы использования СПГ внутри страны в качестве альтернативы трубопроводной газификации, а также в качестве газомоторного топлива. Он отметил, что российские экспортноориентированные СПГ-проекты информационно закрыты. Это создает проблемы с получением технологий и финансирования. «Однако отрадно отметить, что внутренний российский рынок СПГ прошел точку невозврата и начинает активно развиваться, а мы переходим к обсуждению деталей и нюансов, а не принципиальной возможности его формирования», – отметил С. Тургунов.

В декабре 2014 г. Газпром провел запуск завода в Пермском крае для газификации потребителей Ильинского, Карагайского и Сивинского районов, куда проводить сетевой газ нецелесообразно. Предприятие было построено компанией ОАО «Газпром газэнергосеть», ответственной за газификацию методом поставок сжиженного природного газа. Выступая на конференции, **Николай Геско**, заместитель начальника управления отраслевых программ – начальник отдела перспективных разработок «Газпром газэнергосеть», сообщил о планах по строительству предприятия автономной газификации Томской области, которое будет обеспечивать газом четыре населенных пункта. Производительность комплекса определяется, закончено обоснование инвестиций в проект.

Помимо этого, докладчик рассказал об основных трудностях, связанных с созданием СПГ-проектов в нашей стране. На его взгляд, среди существующих проблем можно отметить отсутствие разветвленной инфраструктуры потребления СПГ и отечественных машиностроительных подразделений, поставляющих комплектные установки СПГ требуемой производительности, плохое качество дорог для доставки сжиженного природного газа, дефицит земельных участков и сложность получения большой электрической мощности на реализацию технологий.

Однако, кроме перечисленных проблем, Н. Геско отметил и положительные тенденции развития рынка СПГ в России. По его мнению, увеличение производства СПГ будет способствовать снижению его себестоимости, сделав его доступным для потребителя, развитию системы потребления СПГ в различных областях и выпуска криогенного оборудования.

Ранее предполагалось, что рынок сжиженного природного газа будет глобальным, но заявленные планы не подтвердились, и на данный момент сформировались отдельные региональные рынки Северной Америки, Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). В мировом масштабе прогнозируется увеличение спроса на газ более чем на 40 %, и существенная его часть будет востребована в АТР.

Для обеспечения роста потребления газа Россия разрабатывает большое число СПГ-проектов, нацеленных в основном на рынок АТР. Об этом в своем докладе, посвященном реализации таких проектов и перспективам выхода на рынок АТР, рассказала **Анастасия Масалкова**, старший преподаватель факультета экономики и управления РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина.

Осуществление СПГ-проектов представляет определенный интерес для бизнеса, но есть проблемы с их реализацией. Например, введенные санкции со стороны США и ЕС в энергетической сфере ограничивают возможности по приобретению технологического оборудования и могут привести к задержкам ввода СПГ-проектов минимум на 2-3 года. Существуют также ценовые риски при выходе России на мировой рынок сжиженного природного газа.

В первую очередь это связано с тем, что за последние месяцы цена на нефть резко упала, а поскольку цена на СПГ привязана к нефтяной индексации, есть вероятность, что российские СПГ-проекты не окупятся.

Строительство основных технологических комплексов по сжижению природного газа планируется завершить до 2020 г. Для России это создает новые риски ввиду того, что рынок СПГ продолжает формироваться, потребности стран АТР растут, но вместе с тем растет и предложение, которое сформирует более низкую цену на рынке СПГ. Затягивание реализации российских СПГ-проектов чревато для нас появлением совершенно иной рыночной конъюнктуры.

В условиях санкций разработка проекта «Печоры СПГ» и создание на его базе завода по производству СПГ пока не выглядят экономически обоснованными. К тому же у предприятия отсутствует экспортная лицензия, но данная проблема может быть решена в ближайшее время внесением поправок в закон «Об экспорте газа».

У проекта «Сахалин-3» существует вероятность возникновения трудностей с ресурсным обеспечением. Проблема финансового обеспечения является основной у проекта «Балтийский СПГ», и привлечение иностранных инвесторов в сложившейся ситуации для данного проекта чрезвычайно важно. Санкции могут также оказать влияние на финансирование проекта «Владивосток СПГ» и внести ограничение по приобретению зарубежных технологий. Что же касается проекта «Ямал СПГ», то тут могут возникнуть вопросы с поиском новых потребителей и невозможностью регулярных поставок газа в восточном направлении.

Подводя итоги своего выступления, А. Масалкова отметила, что рыночная ниша для российского газа на рынке АТР все же существует, которая оценивается на уровне 15 млн т. России необходимо наращивать производственные мощности, чтобы выйти также и на другие рынки по экспорту СПГ, активно внедряться в финансовые рынки стран АТР, Европы и США. В таком случае к 2020 г. наша страна сможет нарастить долю присутствия и стать лидером поставок СПГ на мировом рынке.

На конференции присутствовали представители иностранных компаний Technip и Air Liquide Global Solutions France, вовлеченных в разработку российских СПГ-проектов. В частности, Technip принимает участие в проекте «Ямал СПГ». Отвечая на вопрос о рисках, связанных с ограничением поставок оборудования, **Пьер Кузи**, региональный директор компании Technip по России, подчеркнул, что они столкнулись с последствиями санкций, а именно с ограничением финансирования. Но тем не менее, менеджмент корпорации справляется с решением данных проблем. Что касается перспектив на будущее, компания Technip заняла выжидательную позицию, но вместе с тем надеется, что в скором времени все потребности в ресурсах и финансировании СПГ-проектов будут удовлетворены.

**Николя Фоаран**, глава департамента по решениям в энергетическом и экологическом секторах компании Air Liquide Global Solutions France, также отметил трудности с финансированием, подчеркнув, однако, что работа по проектам малотоннажных установок сжиженного природного газа, которыми занимается компания, продолжается.

Круглый стол, посвященный малотоннажному производству СПГ, открыл модератор совещания **Станислав Горбачев**, главный научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Он рассказал об особенностях и отличиях малотоннажных СПГ-установок от крупнотоннажных. Как правило, в данном случае для сжижения газа, который отбирается из магистральных газопроводов и распределительных сетей, используются новые технологии: дроссельные циклы высокого давления, открытые детандерные циклы на ГРС или компрессорных станциях, закрытые циклы на отводах магистральных газопроводов.

С. Горбачев не обошел стороной и основную опасность при производстве СПГ – пролив жидкости. В этой ситуации газ начинает испаряться, появляются холодные пары, заполняющие поверхность загазованной территории. В случае появления источников воспламенения паровое облако вспыхивает и образует огненный шар с очень сильной зоной поражения.

В ходе своего выступления докладчик рассмотрел вопрос использования СПГ в качестве газомоторного топлива. Так, Китай, вышедший на рынок ГМТ в 2004 г., реализует около 6,5 млрд т топлива в год. На сегодняшний день действуют 5000 газозаправочных станций, 1700 из них работают на криогенном топливе (1300 на СПГ, 400 на КПГ). На одну станцию приходится 315 автомобилей. В России же сейчас 86 тыс. автомобилей, работающих на газомоторном топливе, и 247 заправочных станций. В год реализуется 360 тыс. м<sup>3</sup> газа. Пример Китая показывает, что возможность реализации 5 млн т/год сжиженного природного газа,

предназначенного для широкого использования на автотранспорте, реальна. Именно такая задача сегодня стоит у Газпрома.

По мнению **Алексея Маслова**, технического редактора журнала GasWorld, некорректно рассматривать в качестве примера опыт применения СПГ в Китае, Корее и Японии. Все вышеперечисленные страны являются импортерами сжиженного природного газа, имеют огромные терминалы по получению СПГ в готовом виде. У России – путь экспортера, который ближе к Австралии и Америке, нежели к азиатским странам.

Этому высказыванию возразил **Виктор Семенов**, начальник лаборатории НИО «Криогенмаш», отметив, что сегодня Китай в плане сжиженного природного газа развивается двумя путями: реализует на терминалах привозной СПГ и газ собственного производства. В общей сложности в стране имеются около 40 собственных установок, работающих по циклу высокого давления, 15 из которых были поставлены балашихинским предприятием. В. Семенов считает, что в настоящее время Китай может рассматриваться не только как потенциальный партнер, но и как пример для подражания.

Сложившуюся ситуацию в области нормативно-технических документов, которые касаются производства и использования сжиженного природного газа, обрисовал **Андрей Капитонов**, заместитель директора центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

**Олег Черемных**, генеральный конструктор «Уралкриомаша», рассказал о разработке и создании контейнеров-цистерн для мультимодальных перевозок СПГ, особенность которых заключается в том, что они являются смешанными, то есть осуществляются железнодорожным, автомобильным и морским транспортом.

Одним из преимуществ подобных типов контейнеров является соблюдение требований пожарной и экологической безопасности в случае возникновения таких аварийных ситуаций, как пожар в арматурном отсеке емкости, несанкционированное трогание с места стоянки при «сливе-наливе» и разгерметизация теплоизоляционной полости емкости.

**Андрей Старцев**, региональный руководитель GE Oil&Gas Distributed Gas Solutions, представил доклад по модульным малотоннажным установкам производства СПГ General Electric. Установки проектируются, изготавливаются и перед отправкой заказчику полностью собираются на заводской площадке GE Oil&Gas. После сборки в заводских условиях и всех необходимых проверок, тестов и инспекций установка разбирается на отдельные модули, готовые к транспортировке. Сборка всей установки на подготовленной площадке заказчика занимает несколько недель.

**Евгений Слободов**, президент и технический директор MV&E, рассказал о поставщике баллонов для промышленных газов и альтернативных технологий компании Worthington Industries. В текущем году концерн приобрел турецкую криогенную компанию Aritas и начал строительство второй производственной площадки по выпуску емкостей для криогенных жидкостей в г. Бандырма, которое будет завершено в 2015 г. Продукция компании задействована в крупных проектах по сжиженному природному газу. Так, две криогенные емкости объемом 475 м<sup>3</sup> заказаны для предприятия «Ямал СПГ». Плановый срок завершения их производства – май 2015 г.

**Александр Гаина**, инженер 31-й лаборатории «Крыловского государственного научно-го центра», рассказал о разработке грузовой емкости из полимерных композиционных материалов для хранения и перевозки СПГ морем. В рамках выполнения проекта были проведены экспериментальные исследования, включавшие испытания на прочность, герметичность и теплопроводность. Результаты позволили сделать вывод, что применение полимеров обеспечивает снижение массовых характеристик, повышение теплоизоляционных свойств емкости и надежности конструкции, упрощает изготовление и сокращает сроки сборки.

**Борис Фролов**, заместитель главного инженера «ВНИКТИ», сообщил, что на протяжении нескольких лет предприятие разрабатывало два вида тепловозов: грузовой магистральный и маневровый газопоршневой. Сравнительно недавно конструкторско-технологическим институтом был проведен испытательный пробег первого серийного магистрального газотурбовоза ГТ1h-002 весом в 9 тыс. т от ст. Рыбная (Рязанская область) до г. Орехово-Зуево. Особенностью транспортного средства является то, что оно работает на СПГ, что позволяет улучшить тяговые свойства, сократить расход электроэнергии и снизить объемы вредных выбросов. Двигаясь со скоростью 50 км/ч, поезд преодолел около 150 км за три часа, израсходовав около 3 т СПГ.

### Международная конференция «КПГ 2014»: медленно, но верно

70

Россия постепенно движется в сторону более активного использования компримированного природного газа (КПГ). Принимаются активные меры для стимулирования регионов к переходу на использование данного вида топлива. Однако по-прежнему слабо развитой остается инфраструктура АГНКС, что тормозит процесс перевода транспортных средств на газ, а также не решена проблема ценового регулирования.

Этому была посвящена третья международная конференция «КПГ 2014», прошедшая 17 декабря в Москве, организованная компанией CREON Energy при поддержке Общероссийской общественной организации «Деловая Россия» и Национальной газомоторной ассоциации. Генеральным информационным партнером выступила «Российская газета Бизнес», информационным спонсором – журнал «Нефть России».

Генеральный директор CREON Energy **Санджар Тургунов**, открывая конференцию, отметил, что компания «Газпром» как самостоятельно, так и совместно с государством принимает активное участие в переводе коммунального и личного транспорта на КПГ. Но проблемы прошлых лет – нехватка инфраструктуры, вопросы безопасности, ценообразование – никуда не исчезли.

Ценовое регулирование КПГ в России с учетом международного опыта осветил **Пётр Золотарёв**, исполнительный директор по развитию КПГ-проекта компании «Русские Машины». Первостепенной задачей при развитии рынка газомоторного топлива является достижение наименьшей стоимости пробега транспорта на КПГ по сравнению с транспортом на других видах жидкого моторного топлива и СУГ (пропан-бутан). Как показало технико-экономическое моделирование, на расширение использования природного газа в качестве ГМТ в большей степени влияют следующие параметры: километраж (дневной пробег общественного, коммерческого транспорта); цена приобретения (первичная стоимость приобретения, цена инвестиций в транспорт); непосредственно цена на КПГ. Цена газомоторного топлива должна не только обеспечивать достаточный объем экономических выгод владельцам транспорта на КПГ, но и стимулировать инвесторов к расширению сетей заправок КПГ и СПГ.

В странах с наибольшим развитием использования КПГ применялось как ценовое регулирование, так и комплексные системные меры поддержки различного характера (при организации конкурсов на перевозки – дополнительные баллы за использование КПГ, допуск транспорта на КПГ в центр города, природоохранные зоны и т.д.).

Исключительно ценовым регулированием существующую проблему решить нельзя, поэтому нужен комплексный подход к вопросу развития инфраструктуры заправок, сервиса, поддержки в виде субсидий закупок транспорта на КПГ, сбалансированности ценового подхода. Для формирования спроса и предложения на рынке КПГ стоит скоординировать взаимодействие всех его участников: государства, топливных ритейлеров и автопроизводителей. По мнению докладчика, необходимо выработать долгосрочную политику субсидирования конечного пользователя либо производителей транспорта.

В качестве примера был приведен опыт Италии, применившей механизм регулирования цен в виде субсидий, причем не только к автомобильной промышленности, но и к развитию инфраструктуры и ее строительства. В итоге в стране был совершен эффективный переход на газомоторное топливо: машин, работающих на природном газе, здесь значительно больше, чем в ряде других европейских стран при равном числе АГНКС.

В России также сделан шаг в этом направлении. В октябре 2014 г. премьер-министр РФ Дмитрий Медведев утвердил распоряжение о распределении субсидий в размере 3,77 млрд рубл. бюджетам субъектов РФ на закупку автобусов и техники для ЖКХ, работающих на газомоторном топливе.

**Евгений Пронин**, главный специалист «Газпром экспорт», руководитель рабочего комитета «Использование газа» Международного газового союза в своем докладе рассказал о развитии мирового рынка КПГ, который продолжал расти несмотря на то, что нефть и нефтепродукты остаются основными в обеспечении энергетикой транспортного комплекса. Парк машин на КПГ и СПГ увеличился на 13 % и превысил 22 млн ед. Число газовых заправок увеличилось на 20 % (26,5 тыс. станций), а учтенный спрос на метан вырос на 43 %, превысив 40 млрд м<sup>3</sup>/год.

По темпам развития рынка КПГ продолжают лидировать Китай, Индия, Аргентина,

Бразилия, Пакистан. Европа продолжает демонстрировать рост, но не такой заметный, как в Азии. Потенциал европейского газомоторного рынка к 2020 г. оценивается примерно в 40-45 млрд м<sup>3</sup> природного газа в год, при этом 35-40 % будут приходиться на СПГ.

С докладом, посвященным развитию сети АГНКС, выступил **Андрэ Шуманн**, руководитель департамента компании «Э.ОН Россия». На сегодняшний день по числу газонаполнительных станций лидером в Европе считается Италия (более 1000 заправочных комплексов), затем следует Германия (920 АГНКС).

В рамках обсуждения докладов очень часто поднимался вопрос государственной поддержки. А. Шуманн согласился с мнением, что государство должно создавать рамочные условия для законного бизнеса, но в то же время подчеркнул, что ни одной государственной субсидии для развития инфраструктуры АГНКС в Германии выделено не было. Инициатива развития в данном случае исходила от региональных и межрегиональных поставщиков газа, создавших в 2002 г. компанию «Эрдгаз Мобиль», которая выступает генеральным подрядчиком по строительству АГНКС в стране (от проектирования до ввода в эксплуатацию). Организация разработала единые стандарты безопасности для всех заправочных станций, занималась согласованием межрегионального сетевого планирования для внедрения станций в существующую газотранспортную сеть, а также разработкой типовых договоров с нефтяными и газообеспечивающими компаниями.

**Владислав Лукшо**, начальник управления ФГУП НАМИ, рассказал об испытаниях автотранспортных средств с газовыми двигателями, которые проводились на динамометрической дороге центра испытаний НАМИ в соответствии с методикой, основанной на определении скоростных свойств АТС по ГОСТ 22576-90 и топливной экономичности по ГОСТ Р 54810-2011. Ожидается, что жизненный ресурс эксплуатации газовых двигателей до капитального ремонта будет не ниже ресурса двигателей, которые работают на дизельном топливе.

Среди тенденций развития газовых двигателей докладчик обозначил снижение их рабочего объема, применение высокого наддува и распределенного фазированного впрыска газа, литровую мощность, переход на стехиометрические смеси.

**Надежда Власенко**, ведущий научный сотрудник Центра экологической безопасности, энергоэффективности и охраны труда ООО «Газпром ВНИИГАЗ», подготовила сообщение об экологических преимуществах использования природного газа в качестве моторного топлива. Докладчик выделила следующие положительные стороны: получение ГМТ на основе передовых доступных технологий; стабильно низкие цены; возможность газифицировать удаленные от газопроводов труднодоступные регионы страны; доступность и просторанненность природного газа. Среди технических преимуществ – увеличение срока службы двигателя в 1,5-2 раза и ресурса двигателя на 50 %, простота заправки, относительная легкость газобаллонного оборудования. В экологическом плане – это снижение токсичных и канцерогенных выбросов в атмосферу.

К участникам круглого стола, посвященного обеспечению транспорта экологически чистым метановым топливом, обратился его модератор **Станислав Люгай**, директор Центра использования газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ», исполнительный директор НП «Национальная газомоторная ассоциация», отметив, что в настоящее время руководством страны дан старт масштабной программе по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива, а газификация транспорта – важный шаг к повышению экономической и энергетической эффективности транспортных перевозок в РФ.

В настоящее время региональные власти разрабатывают необходимую законодательную базу и закупают транспорт на метане, автопроизводители расширяют модельный ряд новыми образцами газомоторной техники, перевозчики предпринимают шаги по эффективной эксплуатации газомоторного транспорта. Ряд мероприятий направлен на развитие и расширение использования природного газа в качестве моторного топлива. Объединение усилий всех заинтересованных сторон позволит системно развивать рынок ГМТ в масштабах всей страны.

Также внимание участников было обращено на проблемные вопросы и задачи, решение которых будет способствовать эффективному развитию газозаправочной и газоиспользующей инфраструктуры: безопасность производства, хранения, транспортировки и использования газомоторного топлива; безопасная эксплуатация транспорта; производство отечественного газозаправочного и газоиспользующего оборудования; снижение капитальных затрат и себестоимости КПП; обеспечение потребителя качественным топливом, отвечающим экологическим требованиям; совершенствование нормативно-технической документации по проектированию, строительству, реконструкции и эксплуатации автотранспортных предприятий, сервисных центров по переоборудованию транспортных средств и пр.



К обсуждению имеющихся проблем присоединился **Николай Лапушкин**, начальник лаборатории АГНКС ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Эксперт отметил, что поставляемый по трубопроводам природный газ в некоторых местах для его соответствия экологическому классу 4 и выше, установленному техрегламентом для моторных топлив транспортных средств, требует дополнительной подготовки. Для применения КПП в современных автомобилях с ограничением выбросов ОГ на уровне Евро-5 необходимо проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению его качества путем удаления серы, твердых частиц и высококипящих компонентов, которые приводят к ухудшению рабочего процесса газового двигателя и, как следствие, к повышению его нагруженности.

В ходе заседания был поднят еще один немаловажный вопрос, касающийся ценообразования на КПП. Напомним, что летом этого года Минэнерго разработал проект документа, который ограничивал бы розничную цену КПП – не выше 35 % стоимости дизтоплива. При таком подходе газозаправочный бизнес станет убыточным. В свою очередь, компания «Газпром газомоторное топливо», являющаяся единым оператором по развитию рынка ГМТ от Газпрома, представила все необходимые экономические расчеты, в том числе и в Минэкономразвития. На высшем государственном уровне было принято решение о нецелесообразности привязки к такой низкой (35 %) ценовой планке газомоторного топлива. В настоящее время предлагается рассмотреть вариант рыночного ценообразования на КПП.

В рамках круглого стола **Валерий Яшин**, генеральный директор объединения «Компрессор», рассказал о продукции предприятия. На протяжении 16 лет основной его деятельностью является разработка, изготовление и поставка АГНКС, распределенных от Крайнего Севера (Новый Уренгой) до южных регионов (Волгоградская область). Станции работают в разных температурных условиях и наиболее всего подходят к программе импортозамещения, так как сделаны на 99 % из отечественного оборудования.

**Сергей Мандрик**, генеральный директор компании «Промэнергомаш», участвующей в программе строительства АГНКС в России, в рамках круглого стола рассказал о том, что на сегодняшний день предприятие плотно сотрудничает с «Газпром газомоторное топливо» и готовит к отгрузке полнокомплектную АГНКС, включающую весь комплекс необходимого оборудования (от блока входных кранов до колонок). Производительность газа 900, 1000 и 2400 м<sup>3</sup>/ч. Разработки компании позволяют осушать, очищать и приводить качество газа к нормам Евро-4.

**Никита Васильев**, руководитель проекта «Автомобили LCV и LDT с ГБО» «Группы ГАЗ», представил в своем докладе комплексное предложение для развития инфраструктуры КПП, включающее автомобильную и автобусную технику, работающую на КПП, а также оборудование АГНКС. В расширенный модельный ряд транспортных средств, работающих на КПП, входят легкие коммерческие автомобили, среднетоннажные грузовики, тяжелые грузовые автомобили, автобусы малого, среднего и большого классов. Докладчик выразил надежду на то, что принимаемые правительством меры (субсидирование регионов на закупку автобусов и техники для ЖКХ на КПП, государственное регулирование цен на КПП) повысят спрос на транспортные средства, работающие на ГМТ.

**Андрей Старцев**, региональный руководитель GE Oil&Gas Distributed Gas Solutions, представил доклад о технологическом оборудовании компании для заправочных комплексов КПП. На примере реализации масштабного проекта одного из североамериканских операторов ГМТ эксперт рассказал о финансовой модели развития инфраструктуры газомоторного топлива и влияния капитальных затрат на рентабельность проектов АГНКС и многотопливных заправочных комплексов.

Доклад о современных баллонах для транспортировки КПП был представлен **Радишей Нуничем**, менеджером по работе с ключевыми клиентами Worthington Industries. Компания занимается производством и поставкой бесшовных стальных и композитных баллонов высокого давления для КПП компаниям, занятым серийным производством и переоборудованием автомобилей на метан. Р. Нунич предложил развивать стратегическое сотрудничество с российскими компаниями, обещая со своей стороны предоставить качественные стальные и композитные баллоны, а также удовлетворить спрос потребителя.

Подводя итоги конференции Санджар Тургунов резюмировал, что несмотря на трудности первого периода, использование КПП в России неуклонно растет. Именно сейчас важно не допустить ошибок при формировании фиксированной цены, которая могла бы отпугнуть немногих энтузиастов, взявшихся за дело. Ценообразование должно позволить всем независимым игрокам развиваться и зарабатывать. Только лишь административные усилия успеха иметь не будут.

# Рейтинг экологической ответственности нефтегазовых компаний РФ



9 декабря в Москве подвели итоги первого рейтинга экологической ответственности нефтегазовых компаний РФ, организованного группой «КРЕОН» и Всемирным фондом дикой природы (WWF). Рейтинг проводился при участии Национального рейтингового агентства.

Всего в выборку рейтинга 2014 г. вошло 19 компаний – лидеров по объемам добычи нефти и природного газа. Основных игроков российского нефтегазового сектора сравнивали в следующих категориях:

- экологический менеджмент;
- воздействие на окружающую среду;
- раскрытие информации/прозрачность.

Компании оценивались по 28 критериям. По итогам подсчетов баллов рейтинг возглавила компания «Сургутнефтегаз», на втором месте – «Сахалин Энерджи», на третьем – «Газпром».

Отметим, что настоящий рейтинг базируется на имеющихся в публичном пространстве данных о деятельности компаний на территории РФ. Этот принцип – логическое продолжение тезиса о ведении социально-ответственного бизнеса, что и является глобальной целью рейтинга. Если прежде экологическая ответственность и прозрачность были характерны только для наиболее крупных нефтегазовых компаний, то сегодня ситуация изменилась. В верхней части рейтинга присутствуют не только лидеры отрасли, ведущие бизнес во всероссийском и международном масштабах, но и компании, деятельность которых сосредоточена в отдельных регионах страны.

Рейтинг показал, что российские нефтегазовые компании демонстрируют достаточно высокий уровень информационной открытости в вопросах, связанных с экологической ответственностью. Веб-сайты большинства участников отрасли содержат специальные разделы, посвященные экологическим аспектам их деятельности. Более половины компаний, включенных в рейтинг, ежегодно публикуют специализированные экологические отчеты или раскрывают свои экологические показатели в рамках отчетов об устойчивом развитии. Значительная доля этих отчетов соответствует международным стандартам в области нефинансовой отчетности (GRI), имеет общественное или профессиональное заверение.

Нефтегазовые компании, включенные в рейтинг, показали различный уровень в части предоставления дополнительной информации на этапе ее сбора и обработки Национальным рейтинговым агентством. По уровню сотрудничества на этапе предоставления дополнительной информации компании распределяются следующим образом по трем уровням:

- Высокий уровень – 10 компаний («Роснефть», «ЛУКОЙЛ», «Газпром», «Сургутнефтегаз», «Татнефть», «Газпром нефть», «Башнефть», «Сахалин Энерджи», «НОВАТЭК», «Зарубежнефть»).
- Средний уровень – 2 компании («Салым Петролеум», ИНК).
- Низкий уровень – 7 компаний («Славнефть», «Томскнефть», «РуссНефть», «Белкамнефть», «Альянс», «Эксон НЛ», «Тоталь РРР»).

Таким образом, пилотный проект по экологическому рейтингу нефтегазовых компаний России, который состоялся в 2014 г., оказался успешным. В его основу легла объективная и сопоставимая информация об уровне экологической ответственности 19 компаний российского нефтегазового сектора и масштабах воздействия их деятельности на окружающую среду. Компании активно взаимодействовали по вопросам раскрытия данных, и проект стал реальным стимулом для повышения прозрачности предприятий.

Есть все основания надеяться, что последующие итерации рейтинга будут способствовать совершенствованию его методологии, а значит, увеличению объективности и точности оценок. Ведь, в конечном счете, основная цель рейтинга – стимулирование компаний к эффективному использованию углеводородных ресурсов, защите окружающей среды и ведению в России экологически и социально ответственного бизнеса.



Проверка газомоторного автобуса в ЮАР

## Газомоторные автобусы в Йоханнесбурге

Пассажиры, пользующиеся автотрассами Риа Вайя (Rea Vaya) между центральными районами Йоханнесбурга (ЮАР), вскоре смогут ездить на автобусах, работающих на компримированном природном газе (КПГ), – заявил недавно стратегический советник мэрии этого города Алекс Бимэн на Форуме–2014 Газомоторной ассоциации страны (NGV Africa). Риа Вайя (в дословном переводе «мы идем») – название внутригородской системы автобусного сообщения Йоханнесбурга.

Выступая на конференции, А.Бимэн сказал, что вскоре в автобусном парке, обслуживающем Риа Вайя, к работе приступит новая партия газомоторных автобусов. «Мы считаем, что это своевременное нововведение подаст хороший пример другим использовать альтернативную экологически чистую энергию», – отметил Бимэн и добавил, что данный шаг был запланирован в рамках городской программы, которая направлена на расширение технических инициатив, благоприятных для климата.

В форуме, организованном газомоторной ассоциацией Африки и газомоторной коммуникационной группой (NGV Communications Group), а также одобренным HGV Global, по приглашению Национального института развития энергетики ЮАР приняли участие ведущие эксперты в сфере развивающейся газомоторной отрасли, которые обсудили будущее альтернативного топлива и варианты чистой и доступной энергии.

А. Бимэн процитировал результаты исследований, иллюстрирующие экологические показатели и возможности газомоторных автобусов в части сокращения выбросов оксидов азота, серы и сажи, которые, как известно, главные загрязнители атмосферы. Отдельно отмечалось такое немаловажное преимущество использования газомоторного топлива (ГМТ), как способ в целом снизить затраты на энергоносители.

Представитель мэрии пояснил, что муниципалитет разработал план по созданию транспортной газомоторной инфраструктуры в йоханнесбургском районе Александра. «Вместе с тем мы взаимодействуем с городскими парками и йоханнесбургским рынком свежих продуктов для оценки возможности предоставления нам 1,5 млн тонн отходов для производства биогаза», – сказал он, добавив, что это поможет обеспечить энергией новый газомоторный парк Риа Вайя.

Форум также продолжил обсуждение вопросов по ГМТ, начатое на региональном саммите по использованию газа (Gas Mobility Summit), прошедшем осенью в университете Йоханнесбурга. Именно на саммите было принято решение о конвертации общественного транспорта города и парка мэрии на природный газ.

А. Бимэн подтвердил, что город запланировал конкурсные процедуры по приобретению 150 двухтопливных метробусов (так называемый проект Metrobus). Он добавил, что город будет тратить миллиарды рандов (денежная единица ЮАР) в течение следующих трех лет на пополнение автобусного парка.

В поддержку инициатив муниципальных властей высказался на форуме и Ловелл Эмсли, технический эксперт Ваальского университета технологий, рассказавший о сокращении выбросов парниковых газов на 20-30 % при использовании природного газа в качестве моторного топлива по сравнению с дизельным. «Газовые и двухтопливные автобусы имеют более низкие затраты на техническое обслуживание, – добавил также Эмсли, – поскольку природный газ способствует уменьшению износа двигателя, что увеличивает межремонтный пробег автотранспорта».

<http://www.ngvglobal.com/johannesburg-prepares-for-ngv-buses-1122>

## Увеличение числа АГНКС в Дели

Государственный министр нефти и природного газа Индии Шри Дармендра Прадхан сообщил Совету штатов (Раджья сабха, верхняя палата парламента Индии), что в Дели введены в эксплуатацию 279 АГНКС.

Indraprastha Gas Limited (IGL), уполномоченная компания-поставщик СПГ в Дели, намерена соорудить в городе 11 АГНКС в течение 2014-2016 гг. В настоящее время завершены процессы приобретения или аренды земельных участков под строительство 10 АГНКС.

По данным сайта IGL, в городах Дели, Ноида, Большая Ноида и Газиабад эксплуатируются 760 тыс. транспортных средств, работающих на природном газе.

<http://www.ngvglobal.com/increasing-cng-filling-stations-in-delhi-1127>

## Природный раз – спасение Израиля от загрязнения

Министерство по охране окружающей среды (МООС) Израиля выпустило новые инструкции для владельцев грузовых автопарков, выполнение которых будет способствовать уменьшению загрязнения воздуха. Согласно новым правилам, старые, не соответствующие новым требованиям автотранспортные средства (АТС) будут списаны и заменены новыми, работающими на электричестве или природном газе. МООС было установлено, что треть общего объема токсичных выбросов приходится на автобусы и грузовые автомобили, хотя их доля составляет около 5 % всего числа транспортных средств на дорогах.

МООС издало новые правила, опираясь на полномочия, предоставленные ему израильским Законом о чистом воздухе (2008 г.). На первом этапе новые правила будут применяться только к 28 крупнейшим паркам тяжелых транспортных средств, эксплуатирующим грузовую технику, весящую более 10 тонн. Правила распространяются и на такие компании как Egged и Dan, которые специализируются на эксплуатации шаттлов, туристических автобусов, мусоровозов и других видов городского коммунального транспорта.

В целом новые правила повлияют на эксплуатацию почти 12 тыс. автомобилей, а это – четверть всех тяжелых транспортных средств Израиля. Нововведения в основном направлены на сокращение количества загрязнений при использовании транспортных средств на дизельном топливе. Токсичные выхлопы дизельных двигателей, как известно, могут привести к возникновению онкологических заболеваний и другим тяжелым последствиям для здоровья человека.

Новые правила предусматривают следующие меры:

- установление средних целевых показателей сокращения выбросов для парка транспортных средств, при достижении которых к 2018 г. двигатели этих АТС будут соответствовать стандартам Евро-4 и Евро-5;
- запрет использования особо загрязняющих транспортных средств;
- требование отключения двигателей, когда транспортные средства простаивают;
- постепенное введение альтернативных энергоносителей на транспорте (электричество, природный газ, биодизельное топливо) и перевод на эти виды топлива 3 % АТС к 2020 г.;
- установление правил для предотвращения «видимого выделения дыма» от транспортных средств;
- требование к водителям освоить навыки экономически эффективного и «зеленого» вождения;
- представление и публикация владельцами автопарков докладов о переходе на альтернативные виды топлива, благодаря которым жители могли бы иметь возможность следить за соблюдением всех правил транспортными компаниями.

Правилами также предусмотрены установка фильтров, изъятие старых и загрязняющих окружающую среду транспортных средств из эксплуатации, оснащение автопарка новыми транспортными средствами, а также использование альтернативных топливных технологий. Компаниям, не соблюдающим положение, грозит штраф в размере до 850 тыс. израильских шекелей (216 тыс. долл. США), а также уголовное наказание.

Следует отметить, что многие компании уже используют улучшенные транспортные средства. Тем же компаниям, у которых парки состоят из старых дымящих машин, предстоит нести расходы.



Скоро таким автомобилям не будет места на израильских дорогах

Альтернативные виды топлива могут стать лидерами на газомоторном рынке, поскольку их использование, помимо существенного снижения выбросов загрязняющих веществ, даст экономию финансовых средств. Однако существуют и препятствия для появления таких технологий на израильском рынке. Многие компании, например, готовы использовать природный газ, но не сделают этого, пока не увидят достаточного числа АГНКС. И наоборот газовые компании не планируют строить новые АГНКС, пока не появится необходимое число АТС, использующих природный газ. Поскольку новые правила фактически требуют от транспортных компаний значительных перемен уже к 2016 г., то аналитики предсказывают, что барьеры, мешающие проникновению газомоторных технологий на израильский рынок, все же будут преодолены. Использование газовых автобусов и мусоровозов пойдет на пользу экологии страны.

Проверки загрязнения воздуха в населенных пунктах, которые регулярно проводит МООС, указывают на высокие концентрации вредных веществ, не соответствующие ранее утвержденным стандартам, что приводит к увеличению заболеваемости и даже смертности среди населения. Недавно опубликованные в прессе данные показали, что загрязнение воздуха в Израиле ежегодно приводит к 2500 преждевременным смертям. И большая часть выбросов в городских районах поступает от автомобильного транспорта.

Анализ, проведенный МООС, подтвердил, что 35 % дизельной техники несет ответственность за 75 % всех автомобильных выбросов. Поэтому уменьшение загрязнения воздуха для Израиля очень актуально.

Самым загрязненным городом в стране является Хайфа, Тель-Авив занимает второе место по этому печальному показателю. Иерусалим находится на четвертом месте.

<http://www.ngvglobal.com/33811-1211>

## Японское классификационное общество одобрило новый дизайн двухтопливного мотора

Японское классификационное общество ClassNK официально утвердило проект нового двухтопливного двигателя 28АНХ-DF, разработанного компанией Niigata Power Systems Co., Ltd. Этот двигатель планируется использовать в качестве основного на новом буксире компании Keihin Dock Co., Ltd. для NYK Line. Судно будет первым в Японии буксиром, работающим на СПГ (за исключением собственно судов для транспортировки СПГ).

Новые правила и более строгие ограничения на выбросы серы со стороны Международной морской организации (ИМО) способствуют росту спроса на новый двигатель. Низкое содержание серы в природном газе и доступность СПГ могут стать движущей силой для судовладельцев и производителей техники, рассматривающих возможности использования сжиженного природного газа в качестве топлива для морских судов.

Двухтопливный двигатель Niigata 28АНХ-DF обладает максимальной номинальной мощностью 320 кВт на цилиндр. Он был разработан для использования, в первую очередь, на оффшорных вспомогательных судах и буксирах. Двигатель, который работает на дизельном топливе и СПГ, будет соответствовать строгим требованиям ИМО. Технологии, примененные в новом двигателе, были разработаны при поддержке японского министерства земли, инфраструктуры, транспорта и туризма, а также компании ClassNK.

Генеральный директор машиностроительного отдела ClassNK Юкихиса Шибата сказал: «Спрос на двухтопливные двигатели растет, так как новые экологические ограничения очевидны, и отрасль признает важность охраны окружающей среды. Поддержка использования двигателей с низким уровнем выбросов – один из способов, которым мы можем помочь операторам и производителям судов практически решать экологические проблемы, а также поощрить широкое распространение новой технологии».

Модель двигателя будет проходить пробные эксплуатационные испытания.

<http://www.ngvglobal.com/classnk-greenlights-niigata-dual-fuel-engine-design-1128>

Перевод Александры Хлыстовой



Новый двухтопливный двигатель

## Abstracts of articles

P. 12

### *Numerical modeling of the thermal state of the metal-cylinder carin spending methane*

Svetlana Belousova, Vladimir Zarubin, Yakov Osadchy

The engineered mathematical model of the typical automobile cylinders' thermal state used in numerical simulations of pressure changes in the process of consumption of methane from metal-cylinder. This process is accompanied by a significant decrease of temperature in the cylinder of methane and uneven cooling of the main load-bearing elements that affects their mechanical interaction and can shorten the service life of the cylinder. Metal-bearing cylinder with metal liner reinforced with composite materials on the outer surface of the shell (the second structural type) is reviewed. A refined version of the equation of methane state most closely correlated with the experimental data is used in the simulation. The results of numerical simulations at different ambient temperatures and several flow rates of methane are presented.

**Keywords:** numerical simulation, thermal model of the cylinder, the equation of methane state, heat transfer in natural convection.

P. 22

### *Hogs running on natural gas*

Vladimir Rudenko

The article describes the concept of a main and shunting locomotives using natural gas as a vehicle fuel. The problems of gas turbines and gas engines for locomotives are discussed and the choice of LNG for power vehicles is justified.

Some articles in the media affect the development of gas-turbine problem - one of the directions to create a standalone locomotive running on natural gas (NG). Despite the unprecedented low technological level of these publications, they are not only misleading the technical society, but also influence decision-making. In that context, proposed article is not a response on those publications, but a review of the concept of creating locomotives using natural gas as a vehicle fuel.

**Keywords:** natural gas, CNG, LNG, locomotive (hog), gas turbine, gas powered shunting locomotive, gas turbine, gas engines.

P. 30

### *Efficiency of dimethylether's application on motor-service*

Viktor Yerokhov

Physico-chemical and motor features of the dimethylether are analyzed. The design and functional features of the fuel equipment of a new generation for submission of dimethylether are given. The assessment of the technical, socioeconomic and environmental efficiency of the dimethylether on road transport is given.

**Keywords:** dimethylether, gas-diesel equipment, single stage gas reducer-evaporator, electromagnetic gas burner, a gas-main, system of governance, the efficiency of application of dimethylether.

P. 45

### *Systems of hydrogen storage on the vehicle board*

Valery Fomin

A comparative analysis of development characteristics and prospects of various systems of on-board vehicle hydrogen storage is carried out. Taking into account the existing condition of domestic structure of motor transport technologies the expediency of on-board hydrogen storage in chemically-bonded state in liquid media is proven.

**Keywords:** on-board hydrogen storage, hydrogen media, conversion, thermochemical conversion.

P. 56

### *Computational analysis of fuel injection process in a diesel engine running on water-fuel emulsion*

Vladimir Markov, Vladimir Shumovsky, Viktor Akimov

The possibility of using water-fuel emulsions as a fuel for diesel engines is considered. The design of an emulsifying device used for producing water-fuel emulsions is presented. The analysis of chemical-physical characteristics of the examined emulsions is carried out. The results of experimental research on a D-245.12C diesel engine, with the engine running on diesel fuel and water-fuel emulsions with different percentage of water and fuel are demonstrated. Computational analysis for fuel supply process in the diesel engine running on water-fuel emulsion is carried out.

**Keywords:** diesel engine, diesel fuel, water-fuel emulsion, fuel injection process, spraying, mixture forming, sprayer.

## Авторы статей в журнале № 1 (43) 2015 г.

**Акимов Виктор Сергеевич,**  
аспирант кафедры «Теплофизика»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
р.т. (499) 263-69-18

**Белосова Светлана Юрьевна,**  
ведущий инженер ЗАО НПП «Маштест»,  
тел. (495) 513-46-92,  
e-mail: svtlnbelousova@gmail.ru

**Ерохов Виктор Иванович,**  
профессор МГТУ «МАМИ», д.т.н.,  
адрес: 107023, г. Москва,  
ул. Большая Семёновская, д. 38, р.т.  
8 (499) 785-62-05, м.т. 8 916-150-17-87,  
e-mail: PDO@mami.ru

**Зарубин Владимир Степанович,**  
д.т.н., Московский государственный  
технический университет имени  
Н.Э. Баумана, профессор кафедры  
«Прикладная математика»,  
м.т. (915) 427-36-11,  
e-mail: zarubin@bmstu.ru

**Марков Владимир Анатольевич,**  
д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
м.т. 8 917 584-49-54, р.т. (499) 263-69-18,  
e-mail: markov@power.bmstu.ru

**Осадчий Яков Григорьевич,**  
д.т.н., генеральный директор  
ЗАО МАШТЕСТ,  
р.т. (495) 513-40-98,  
e-mail: mashtest@mashtest.ru

**Руденко Владимир Федорович,**  
заслуженный конструктор РФ, к.т.н.,  
e-mail: vfrudenko@yandex.ru

**Фомин Валерий Михайлович,**  
д.т.н., профессор Московского  
государственного машиностроительного  
университета (МАМИ), 107023, г. Москва,  
ул. Большая Семеновская, д. 38, р.т. (495)  
434-02-12, м.т. 8 915 211-44-15,  
e-mail: mixalichdm@mail.ru

**Шумовский Владимир Алексеевич,**  
аспирант кафедры «Теплофизика»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
р.т. (499) 263-69-18

## Contributors to journal issue № 1 (43) 2015

**Akimov Viktor,**  
postgraduate of «Heat Physics» department  
of the Bauman Moscow State Technical  
University, office phone: + 7 (499) 263-69-18

**Belousova Svetlana,**  
senior engineer, JSC Scientific  
and Production Enterprise «Mashtest»,  
phone: + 7 (495) 513-46-92,  
e-mail: svtlnbelousova@gmail.ru

**Erokhov Viktor I.,**  
the professor of the Moscow state technical  
university (MAMI), Dr.Sci.Tech., the Honored  
worker of a science of the Russian Federation,  
e-mail: PDO@mami.ru

**Fomin Valery,**  
Professor of Moscow state university  
of mechanical engineering (MAMI),  
office phone: + 7 (495) 369-90-48,  
m.t.: + 7 915 211-44-15,  
e-mail: mixalichdm@mail.ru,  
shustrov@yandex.ru.

**Markov Vladimir,**  
D. Sc. (Eng.), professor of «Heat Physics»  
department of the Bauman Moscow State  
Technical University,  
phone: + 7 917 584-49-54

**Osadchy Yakov,**  
PhD, Engng, general manager, JSC Scientific  
and Production Enterprise «Mashtest»,  
phone: + 7 (495) 513-40-98,  
e-mail: mashtest@mashtest.ru

**Rudenko Vladimir,**  
honoured draughtsman of the RF, PhD. Tekhn,  
e-mail: vfrudenko@yandex.ru

**Shumovsky Vladimir,**  
postgraduate of «Heat Physics»  
department of the Bauman Moscow State  
Technical University,  
phone: + 7 (499) 263-69-18

**Zarubin Vladimir,**  
Doctor of Technical Sciences, professor of the  
Bauman Moscow State Technical University,  
phone: +7 (915) 427-36-11,  
e-mail: zarubin@bmstu.ru

## Перечень статей, опубликованных в журнале «Транспорт на альтернативном топливе» в 2014 г.

### № 1 (37)

1. Обращение Председателя Совета директоров ОАО «Газпром» Виктора Зубкова
2. Метан на газомоторном рынке: итоги 2013
3. Патрахальцев Н.Н., Камышников Р.О., Савастенко Э.А., Скрипник Д.В. Снижение дымности отработавших газов дизеля путем добавки альтернативных топлив к основному
4. Козлов С.И., Фатеев В.Н., Люгай С.В. Автомобили с водородными поршневыми двигателями
5. Евстифеев А.А. Математическая модель процесса заправки транспортных средств КПП на АГНКС
6. Поживилов Н.В. Методика определения оптимального срока службы автобуса особо малого класса
7. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Коклин И.М. Использование природного газа в качестве моторного топлива для сельскохозяйственной техники
8. Федоров Е.П., Яновский Л.С., Варламова Н.И., Разносчиков В.В., Демская И.А. Получение из гидрата природного газа газообразного и жидкого метана – новый путь освоения энергетических ресурсов Севера
9. Пронин Е.Н. Муниципальный автобус на метане
10. Автомобильный биометан – опыт Финляндии
11. Польша: пионерные СПГ-решения
12. Shell и Caterpillar на газомоторном рынке
13. Белоруссия: МАЗ и газ вместе
14. Мировой рынок природного газа в качестве моторного топлива по состоянию на ноябрь 2013 г.
15. По пути наибольшего сопротивления
16. Движение по кругу
17. Abstracts of articles
18. Авторы статей в журнале № 1 (37) 2014 г.
19. Перечень статей, опубликованных в журнале «Транспорт на альтернативном топливе» в 2013 г.

### № 2 (38)

1. Обращение к читателям
2. Заседание совета НГА
3. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Топливные элементы – перспективные химические источники электрической энергии
4. Марков В.А., Девянин С.Н., Шумовский В.А. Работа дизелей на многокомпонентных водотопливных эмульсиях
5. Акопова Г.С., Власенко Н.Л., Тетеревлев Р.В. Индикаторы экологической результативности и безопасности эксплуатации автотранспортных средств на природном газе
6. «Газпром газомоторное топливо» и Приморский край будут совместно развивать рынок газомоторного топлива
7. «Великий Новгород» станет крупнейшим газовозом во флоте Газпрома
8. Газпром и Газпромбанк будут вместе реализовывать проекты «Балтийский СПГ» и «Владивосток СПГ»
9. Шендрик А.М. Альтернативный способ подготовки газа к транспортировке на истощенных месторождениях
10. Петров П.П. Особенности применения газомоторного топлива на железнодорожном транспорте
11. Ведущие автомобильные организации объединили усилия в борьбе за чистоту окружающей среды
12. Канадские мастерские для средне- и большегрузных автомобилей, работающих на природном газе
13. Развитие газомоторного рынка в Чехии
14. Автобусы в Осло будут заправлять сжиженным биометаном
15. Westport представила технологию двухтопливного двигателя GEMDi
16. Евросоюз: водородные гибридные автобусы
17. Открыта первая АГНКС в Мадриде
18. МАЗ презентует новинку
19. Abstracts of articles
20. Авторы статей в журнале № 2 (38) 2014 г.

### № 3 (39)

1. Семинар «Рынок газомоторного топлива: состояние, проблемы и перспективные пути развития»
2. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Топливные элементы – перспективные химические источники электрической энергии
3. Фомин В.М. Перспективы отдельных видов альтернативных энергоресурсов в сфере освоения водородной энергетики на отечественном транспорте
4. Проблемы производства альтернативных источников энергии
5. Домбровская И.А. Выставка «Автокомплекс–2014»: не отставать от требований дня!
6. Патрахальцев Н.Н., Петруня И.А., Камышников Р.О., Скрипник Д.О. Снижение токсичности и дымности выбросов дизеля добавкой СПБТ и изменением рабочего объема
7. Александров И.К. Стендовый способ определения механических потерь в пневматической шине
8. Удмуртия: пилотный регион № 18
9. Евстифеев А.А. Методология рационального построения и непрерывного совершенствования региональной сети АГНКС
10. Катаргин В.Н., Терских В.М. Оптимизация процессов управления складом автомобильных запасных частей
11. Газозаправочная колонка FAS 220 WAER с постом заправки газовых баллонов
12. Пронин Е.Н. Африка: развитие рынка ГМТ
13. Временные сложности газомоторного рынка в Пакистане
14. Муниципальный автобус на метане – глобальная тенденция
15. Мировой рынок КПП в качестве моторного топлива
16. Abstracts of articles
17. Авторы статей в журнале № 3 (39) 2014 г.

### № 4 (40)

1. Общее собрание членов Некоммерческого партнерства «Национальная газомоторная ассоциация»
2. Белоусова С.Ю., Зарубин В.С., Осадчий Я.Г. Математическая модель тепловых процессов в автомобильных баллонах с метаном
3. Почукаев М.И., Панов Ю.В., Зенченко В.А., Молчанинов В.И. Исследование степени влияния погодных условий на расход КПП автобусами



4. В России предлагают создать метановую ракету
5. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Улучшение экологических показателей дизеля 4С 11,0/12,5 путем применения природного газа и рециркуляции
6. Разносчиков В.В., Загумённых В.В., Демская И.А. Теплогидравлическая оптимизация авиационной криогенной топливной системы, использующей переохлажденный пропан
7. Газомоторное топливо за рубежом – увеличение экспорта Газпрома
8. Газпром развивает газомоторный рынок Чехии
9. Матюхин Л.М. Особенности использования коэффициентов наполнения «по воздуху» и «по смеси» для оценки результатов газообмена в газовых двигателях
10. Карагусов В.И., Карагусов И.В. Термоакустические охладители на солнечной энергии для орбитальных комплексов
11. 2014-й – Год экологической культуры
12. Табарин В.А., Шестаков А.В., Чжан Ю.В., Ермаков А.А., Палант А.И. Дистанционный лазерный газоанализатор нового поколения, размещаемый на беспилотном летательном аппарате
13. Обсужден Рейтинг экологической ответственности нефтегазовых компаний
14. Новые технологии использования природного газа
15. Научно-квалификационные работы
16. Автопробег «Набережные Челны – Симферополь»
17. Перспективные направления кооперации и сотрудничества с корейскими производителями оборудования
18. Газомоторные перспективы Удмуртии
19. Годовое собрание членов ЕДК
20. Мировой рынок КПП в качестве моторного топлива по состоянию на июнь 2014 года
21. Abstracts of articles
22. Авторы статей в журнале № 4 (40) 2014 г.

## № 5 (41)

1. Рынок газомоторного топлива: точки роста
2. Певнев Н.Г., Банкет М.В., Бакунов А.С. Перспективы развития инфраструктуры использования КПП в Омске
3. Газпром планирует построить семь газовых заправок в Волгоградской области
4. Шендрик А.М., Фык М.И. Использование КПП-технологий в районе прохождения газотранспортной системы как фактор регионального развития
5. Новые технологии использования природного газа
6. Изотов Н.И. Требования к качеству СПГ за рубежом
7. Новый газозов для СПГ
8. Раков В.А., Сальников А.Ю. Уменьшение времени прогрева двигателя и отопления салона транспортного средства за счет использования теплоты отработавших газов
9. Евстифеев А.А. Многокритериальное управление технологическим оборудованием сложных технических систем с использованием методов получения нечетких выводов
10. Карагусов В.И. Систематизация анаэробных силовых энергоустановок
11. Александров И.К. Определение параметров гибридной силовой установки на основании исследований ездового цикла троллейбуса
12. Совещание заводов-изготовителей спецтехники
13. Лиханов В.А., Полевщиков А.С. Определение оптимальных углов опережения впрыскивания топлив при работе дизеля на этаноле
14. Пятнадцать лет успеха на рынке КПП
15. Оренбургский проект по сжижению гелия – трамплин для гелиевых перспектив «Газпрома»
16. Новая АГНКС в Астрахани
17. GasSuf открывает новую страницу
18. Цены на топливо
19. Новости из-за рубежа
20. Abstracts of articles
21. Авторы статей в журнале № 5 (41) 2014 г.

## № 6 (42)

1. Поздравление с Новым годом
2. IV Петербургский Международный Газовый Форум
3. Потапенко М.С., Коклин И.М., Малёнкина И.Ф., Кугрышева Л.И. Исследование эффективности применения КПП способом любительских автопробегов
4. Белов М.Б., Варанкин М.В., Новицкий Я.Ю. Моторное топливо XXI века
5. Газпром развивает рынок ГМТ
6. Газпром внесет существенный вклад в энергообеспечение Азиатско-Тихоокеанского региона
7. Новые проекты по развитию производства СПГ
8. Аكوпова Г.С., Власенко Н.Л., Давыдова Д.О. Эколого-экономический анализ перспектив использования газомоторного топлива на автомобильном транспорте
9. Ковальчук Л.И., Мишачков И.В. Формирование экспериментально-теоретических моделей токсичных выбросов с ОГ двигателя с искровым зажиганием при работе на топливном газе
10. Панов Ю.В. Использование в учебном процессе имитатора системы управления впрыском газа для бензинового двигателя
11. Марков В.А., Девянин С.Н., Неверов В.А. Использование в дизелях смесевых биотоплив с добавками соевого масла
12. Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А., Аношина Т.С., Камышников Р.О. Анализ возможности снижения расхода топлива и токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок
13. Бо Цао., Рачевский Б.С. Использование газомоторного топлива на автотранспорте в Китае
14. Пронин Е.Н., Носов А.М. Автопробег «Голубой коридор 2014: Балтика – Адриатика»
15. Рынок СУГ: внесем ясность?
16. Abstracts of articles
17. Авторы статей в журнале № 6 (42) 2014 г.